

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO
INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CENTRO DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM
TRANSPORTES

INVESTIGAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE ESTRUTURA DE
PAVIMENTOS COM UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DO
TIPO GROUND PENETRATING RADAR - GPR

VALMIR CARNEIRO DE SOUZA

ORIENTADOR: LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE
MELLO

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUDITORIA DE
OBRAS PÚBLICAS RODOVIÁRIAS

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2018

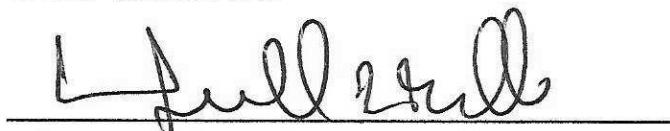
**TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO
INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CENTRO DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM
TRANSPORTES**

**INVESTIGAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE ESTRUTURA DE
PAVIMENTOS COM UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DO
TIPO GROUND PENETRATING RADAR - GPR**

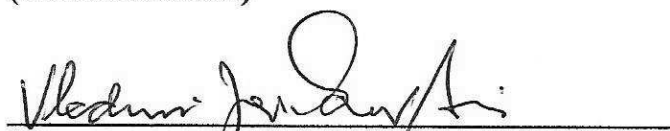
VALMIR CARNEIRO DE SOUZA

**MONOGRAFIA SUBMETIDA AO INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA DO
TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO E AO CENTRO DE FORMAÇÃO DE
RECURSOS HUMANOS EM TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ESPECIALISTA EM AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS RODOVIÁRIAS**

APROVADA POR:



**LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, Dr. (PPG/UnB)
(ORIENTADOR)**



**VLADIMI JOSÉ DANIEL DE ASSIS - Mestre em Engenharia Civil e Ambiental (Área
de concentração: Geotecnia), pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG –
(EXAMINADOR INTERNO)**



**LUIZ FERNANDO URURAHY DE SOUZA - Mestre em Engenharia Civil pela
Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ.
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 19 DE MARÇO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO, ANDRÉ AMARAL BURLE DE

Investigação não destrutiva de estruturas de pavimentos, com utilização de equipamentos do tipo *Ground Penetrating Radar – GPR*.

Brasília, 2018

53p., 210 x 297 mm (ISC/TCU, CEFTRU/UnB, Especialista, Auditoria de obras públicas rodoviárias, 2018)

Monografia de Especialização – Tribunal de Contas da União. Instituto Serzedello Corrêa. Universidade de Brasília. Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes.

1. Investigação de pavimentos
3. Aplicação do GPR em campo

2. Características e uso do GPR

I. ISC/TCU

II. CEFTRU/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, VALMIR C. (2018). Investigação não destrutiva de estruturas de pavimentos, com utilização de equipamentos do tipo *Ground Penetrating Radar – GPR*. Monografia de Especialização, Instituto Serzedello Corrêa, Tribunal de Contas da União, Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 53p.

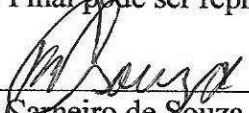
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Valmir Carneiro de Souza

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Investigação não destrutiva de estruturas de pavimentos, com utilização de equipamentos do tipo *Ground Penetrating Radar – GPR*.

GRAU / ANO: Especialista em auditoria de obras públicas rodoviárias / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


Valmir Carneiro de Souza

Av Araucárias, 4530, Resid Península, Apt 603-B, Águas Claras
71.936-250 – Brasília-DF

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à minha família que foi privada de alguns momentos na minha companhia para que este trabalho fosse realizado.

Deixo meus agradecimentos ao Tribunal de Contas da União – TCU, por meio do Instituto Cerzedello Correa – ISC, pela oportunidade de aprendizado, pela estrutura oferecida e o apoio logístico na condução do curso de especialização em obras rodoviárias.

Agradeço à Universidade de Brasília – UNB, pela parceria firmada com o TCU e o ISC, pela estrutura pedagógica e pelo excelente corpo de professores dedicados ao projeto.

Agradeço aos professores engajados na missão de transmitir conhecimentos valiosos para minha vida pessoal e profissional, especialmente ao meu orientador, Professor Dr. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, pela paciência e atenção dedicadas ao meu trabalho e pela pertinência e tempestividade das intervenções.

RESUMO

Será objeto do presente trabalho a missão de abordar as principais características dos métodos não destrutivos de investigação de pavimentos, principalmente focado no método com utilização de equipamentos do tipo *Ground Penetrating Radar – GPR*.

São elencados os principais métodos utilizados para investigação de pavimentos, iniciando-se com os métodos destrutivos, considerados os mais tradicionais e amplamente conhecidos pelos profissionais do ramo de engenharia de pavimentos.

Também são listadas as características dos métodos semidestrutivos, com semelhanças em relação ao anterior, porém com uso um pouco mais restrito, devido à limitação de sua abrangência em termos de ensaios.

O foco deste estudo são os métodos não destrutivos, adequados para cobertura de extensões maiores, mostra-se vantajoso por permitir inúmeras repetições no mesmo ponto e, dessa forma, avaliar a evolução de eventuais problemas investigados durante a vida útil da pista.

Dentre os equipamentos utilizados no método não destrutivo, o foco deste trabalho é o GPR, equipamento com uma proposta de realizar levantamentos em larga extensão, por meio de processo geofísico de emissão de ondas eletromagnéticas, permitindo a coleta de informações na velocidade da via e sem necessidade de interrupção do fluxo de veículos.

Serão apresentadas as principais características técnicas do GPR, bem como resultados de sua aplicação em avaliação de pavimentos, tanto no exterior, quanto no Brasil.

Palavras-chave: investigação de pavimentos asfálticos, ensaios não destrutivos, *Ground Penetrating Radar – GPR*, deflexão, onda eletromagnética.

ABSTRACT

The objective of this work will be to address the main characteristics of non-destructive methods of pavement research, mainly focused on the method using Ground Penetrating Radar - GPR.

The main methods used for pavement investigation are listed, starting with destructive methods, considered the most traditional and widely known by professionals in the field of pavement engineering.

The characteristics of the semi-destructive methods are also listed, with similarities in relation to the previous one, but with a little more restricted use, due to the limitation of their scope in terms of tests.

The focus of this study is the non-destructive methods, adequate to cover larger extensions, it is advantageous to allow numerous repetitions at the same point and, therefore, to evaluate the evolution of any problems investigated during the useful life of the track

Among the equipment used in the non-destructive method, the focus of this work is the GPR, an equipment with a proposal to carry out extensive surveys, through a geophysical process of emission of electromagnetic waves, allowing the collection of information on the speed of the track and no need to interrupt the flow of vehicles.

The main technical characteristics of the GPR will be presented, as well as results of its application in pavement evaluation, both abroad and in Brazil.

Keywords: Asphalt pavement investigation, non-destructive testing, Ground Penetrating Radar – GPR, deflection, electromagnetic wave.

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | APRESENTAÇÃO | 13 |
| 1.2 | PROBLEMA | 13 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.4 | OBJETIVO GERAL | 15 |
| 1.5 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 15 |
| | | |
| 2 | CAPPÍTULO I – MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTOS | 16 |
| 2.1 | MÉTODOS DESTRUTIVOS DE INVESTIGAÇÃO | 17 |
| 2.2 | MÉTODOS SEMIDESTRUTIVOS DE INVESTIGAÇÃO | 19 |
| 2.3 | MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS DE INVESTIGAÇÃO | 20 |
| | | |
| 3 | CAPPÍTULO II – CARACTERÍSTICAS E POTENCIALIDADES DO GPR | 28 |
| 3.1 | TESTES E CALIBRAÇÃO DO MÉTODO GPR | 31 |
| | | |
| 4 | CAPÍTULO III - METODOLOGIA | 37 |
| 4.1 | EXPERIÊNCIAS COM USO DO GPR NO BRASIL | 37 |
| 4.1.1 | Experiência 1 – Alça Viária do Pará (BR-316) | 37 |
| 4.1.2 | Experiência 2 – BR-101 Nordeste – Lote 7 | 41 |
| 4.1.3 | Experiência 3 – ANTT – VIA 040 | 43 |
| 4.1.4 | Experiência 4 – Ilha do Fundão – UFRJ | 45 |
| | | |
| 5 | CONCLUSÃO | 52 |
| | | |
| | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS | 54 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Ilustração do método GPR..... | 12 |
| Figura 2 - Exemplos de extração de corpos-de-prova e de poços de sondagem | 18 |
| Figura 3 – Exemplo de equipamentos DCP de avaliação expedita de solos..... | 20 |
| Figura 4 – Esquema de Viga Benkelman (DNER-ME 24/94 e medida em campo)..... | 21 |
| Figura 5 - Esquema de leitura com FWD e utilização em campo | 22 |
| Figura 6 - <i>Falling Weight Deflectometer – FWD e Low Weight Deflectometer – LWD</i> | 24 |
| Figura 7 - <i>Dynamic Cone Penetrometer – DCP</i> – equipamento e uso em campo | 25 |
| Figura 8 – Sismógrafo (DSPA e PSPA) | 25 |
| Figura 9 – GeoGauge: equipamento e utilização em campo | 26 |
| Figura 10 - <i>Non-Nuclear Electric Gauges</i> (densímetro elétrico, sem tecnologia nuclear) | 26 |
| Figura 11 – Princípios do método GPR – comportamento da onda | 28 |
| Figura 13 – GPR – capacidade de alcance em função da potência da antena. | 30 |
| Figura 12 – Exemplos de antenas de GPR | 35 |
| Figura 14 - Localização Política da Alça Viária do Pará..... | 38 |
| Figura 15 - GPR - GSSI - Modelo SIR System 3000 | 39 |
| Figura 16 – Leitura com GPR – Excesso de umidade na BR-316..... | 40 |
| Figura 17 – BR-101 – Translitorânea | 41 |
| Figura 18 – Radargrama analítico – BR-101 Nordeste – Lote 7 | 42 |
| Figura 19 – GSSI RoadScan e radargrama da VIA040..... | 44 |
| Figura 20 – Leitura com GPR – janelas de inspeção na BR040..... | 44 |
| Figura 21 – IDS Georadar – condução manual. | 46 |
| Figura 22 – IDS Georadar – acoplado ao veículo..... | 46 |
| Figura 23 – Leitura com GPR – interpolação de imagens/antenas..... | 47 |
| Figura 24 – Leitura com GPR – radargrama de poço de visita. | 48 |
| Figura 25 – Leitura com GPR – blocos intertravados. | 48 |
| Figura 26 – Leitura com GPR – paralelepípedo..... | 48 |
| Figura 27 – Leitura com GPR – poços de sondagem. | 49 |
| Figura 28 – Leitura com GPR - Substituição de material | 49 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

| | |
|---------------|--|
| ANTT | Agência Nacional de Transportes Terrestres |
| Dnit | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| TCU | Tribunal de Contas da União |
| GPR | Ground Penetrating Radar |
| CMP | Common Midle Point |
| GSSI | Geophysical Survey System Inc. |
| WARR | Wide Angular Reflection and Refraction |
| COPPE | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia |
| IDS | Ingegneria Dei Sistemi S.p.A |
| CENPES | Centro de Pesquisa da Petrobrás |

GLOSSÁRIO

Reflexão de onda eletromagnética: percentual de energia que retorna ao equipamento após encontrar material reflexivo.

Refração de onda eletromagnética: percentual de energia que é desviada em razão de incidência em ângulo diferente do ângulo de origem.

Atenuação de onda eletromagnética: dissipação de energia em razão das características dielétricas dos materiais com os quais mantém contato.

Permissividade/constante dielétrica: constante física que descreve como um campo elétrico afeta e é afetado pelo meio.

Condutividade elétrica: capacidade que cada material possui para conduzir uma corrente elétrica.

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos são estruturas construídas para dar trafegabilidade às vias, garantindo conforto e segurança no transporte de pessoas e cargas.

Para que esses atributos sejam garantidos, é necessário que sejam estabelecidos métodos confiáveis de avaliação e verificação das condições estruturais e funcionais presentes no pavimento, de modo a verificar sua aderência aos padrões de desempenho exigidos.

Tais padrões devem estar consignados expressamente desde o projeto, mantendo-se na fase de licitação e contratação, registrados nos contratos e termos de garantia, acompanhados durante a execução das obras e exigidos para fins de recebimento do objeto contratado, bem como durante a fase de manutenção do empreendimento.

Os pavimentos são, tradicionalmente, classificados em duas categorias específicas: rígidos e flexíveis. Os primeiros são construídos com placas de cimento *Portland*, armadas ou não com barras de aço, sobre uma base de agregados.

Pavimentos flexíveis são aqueles compostos por agregados e ligantes asfálticos, resultando em um revestimento pouco mais maleável e suscetível a deformações, normalmente construído sobre um conjunto de duas ou mais camadas (base, sub-base e subleito melhorado).

Recentemente, surge uma classificação intermediária, pavimentos semirígidos e/ou semiflexíveis, constituindo estruturas que fazem a junção entre essas duas características, normalmente adicionando características de estruturas rígidas, porém, apenas para reforço.

Avaliar a estrutura de pavimentos é uma das tarefas mais importantes no que concerne à aferição dos padrões de qualidade desejáveis, determinação da vida útil, identificação da necessidade de intervenções etc.

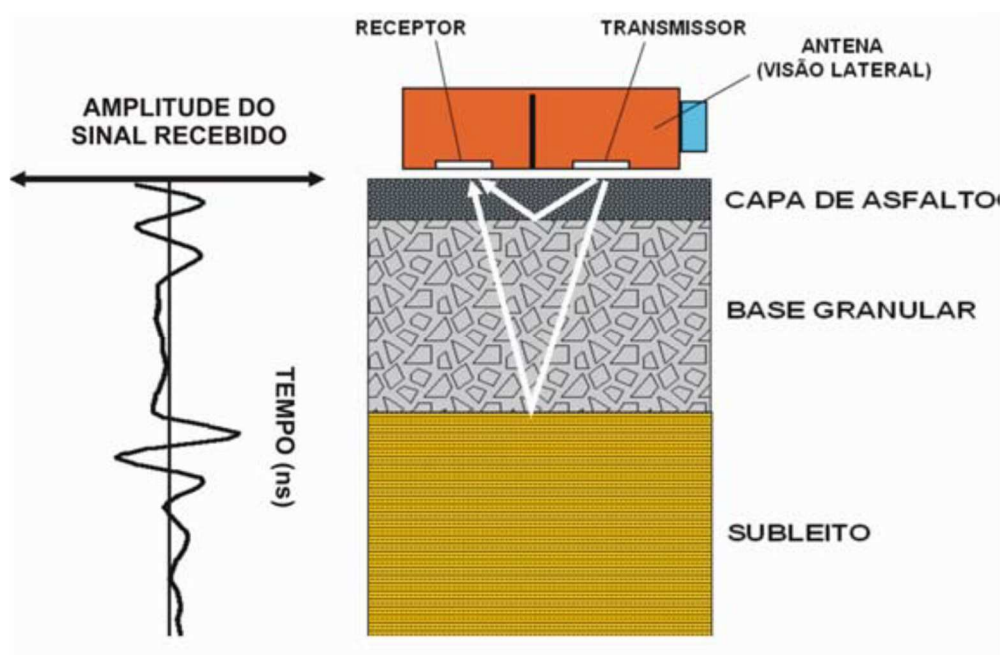
Além disso, é primordial para estabelecer o momento adequado e o tipo de intervenção aplicável a cada caso, além da possibilidade de aplicação de ações preventivas e corretivas com o menor nível possível de impacto sobre as condições da estrutura pré-existente no pavimento a ser investigado.

Tradicionalmente, são identificados três categorias de métodos de avaliação: métodos destrutivos, métodos semidestrutivos e métodos não destrutivos.

Pela própria nomenclatura já se avalia que o primeiro deve causar algum tipo de dano físico ao pavimento, o segundo tenta causar o menor dano possível, enquanto o terceiro buscará informações sem comprometer a estrutura existente.

Entre os métodos não destrutivos de investigação de estruturas de pavimentos destaca-se o *Ground Penetrating Radar – GPR*, também conhecido como radar de penetração no solo, assim descrito: “GPR é um método geofísico que utiliza ondas eletromagnéticas de altas frequências (na faixa de MHz). Estas ondas são emitidas para o subsolo por meio de um transmissor de uma antena, sofrem refrações e reflexões em interfaces e estruturas existentes no subsolo, retornando à superfície, sendo então captadas pelo receptor da antena (Figura 1).” (VIEIRA e GANDOLFO, 2013).

Figura 1 - Ilustração do método GPR



Fonte: (VIEIRA e GANDOLFO, 2013)

Para melhor evidenciar as características e potencialidades do GPR, este trabalho está estruturado em três capítulos, o primeiro capítulo busca conceituar as principais técnicas utilizadas em investigação de estruturas de pavimentos, destacando suas vantagens e desvantagens, além de evidenciar os principais conceitos utilizados na área.

No segundo capítulo será dada maior ênfase às características e potencialidades do GPR, com destaque para trabalhos realizados com utilização desse método e os principais resultados obtidos em outros países.

Já no terceiro capítulo, o foco é uma revisão bibliográfica para identificação de trabalhos realizados em território nacional, com utilização do GPR, abordando o tipo de problema enfrentado, os locais escolhidos para os estudos, as características do equipamento utilizado e os resultados obtidos com a utilização desse método.

1.1 APRESENTAÇÃO

A construção e conservação de rodovias consome grandes vultos de dinheiro público e representa variável de grande importância do ponto de vista econômico, uma vez que a matriz logística brasileira é bastante dependente do transporte rodoviário.

Também não são raros os casos de mau uso do dinheiro público aplicado às obras rodoviárias, materializado em erros construtivos, erros de projeto, falha na seleção e/ou manipulação de materiais, além de fraudes e outros acertos para desviar recursos para fins particulares.

Para minimizar a possibilidade desses vícios e buscar garantir rodovias de boa qualidade é necessário ter acesso a métodos mais avançados de avaliação dessas estruturas, de modo a dispor de uma gama razoável de informações, com bom nível de confiabilidade e com o menor nível de dano possível à estrutura existente.

Nesse prisma, este trabalho se propõe a apresentar os principais métodos de investigação de pavimentos existentes, dando ênfase à investigação com uso de equipamentos do tipo *Ground Penetrating Radar – GPR*.

Espera-se que as informações aqui trazidas possam contribuir para melhoria na qualidade das informações para tomada de decisão, no que diz respeito aos métodos de avaliação de estruturas de pavimento.

1.2 PROBLEMA

Como impulsionadora dos trabalhos aqui pretendidos, foi elaborada a seguinte questão-problema: Quais as principais características técnicas e o nível de informação que é possível se obter com o uso de métodos não destrutivos de investigação de pavimentos, especialmente com uso de equipamentos do tipo *Ground Penetrating Radar - GPR*?

1.3 JUSTIFICATIVA

Como já evidenciado, a avaliação de estrutura de pavimentos é tarefa de suma importância no que concerne à avaliação dos padrões de qualidade desejáveis, determinação da vida útil, identificação da necessidade de intervenções, dentre outros aspectos.

Não se pode negar a grande importância de se estabelecer o momento adequado e o tipo de intervenção aplicável a cada caso, premente a possibilidade de aplicação de ações preventivas e corretivas com o menor nível possível de impacto sobre as condições da estrutura pré-existente no pavimento a ser investigado.

Segundo Bernucci et al (2006), existem três métodos conhecidos de avaliação estrutural de pavimentos: métodos destrutivos, semidestruativos e não destrutivos.

O primeiro provoca danos ao pavimento, são mais conhecidos pelos profissionais da área e apresentam maior número de ensaios e confiabilidade nos resultados.

No caso do segundo método, o dano provocado ao pavimento é menor, porém o número de ensaios disponíveis e a precisão dos resultados são relativamente baixos.

Já para os métodos não destrutivos, não há dano ao pavimento existente, a gama de informações a serem obtidas é consideravelmente superior aos dados coletados com outros métodos, a interferência no tráfego da rodovia é consideravelmente menor e as informações podem estar disponíveis em tempo real.

Os métodos tradicionais de avaliação das características estruturais de um pavimento, normalmente, provocam algum tipo de intervenção destrutiva e, ainda que sejam realizadas correções posteriores, há sempre o risco de danificar a estrutura pré-existente.

Além disso, tais ensaios demandam tempo, equipamentos e pessoal em certa escala, já que será necessário interromper ou controlar o tráfego de veículos, sinalizar o local, fazer furos para retirada de material e, após a retirada do material desejado, aplicação das correções necessárias, antes de devolver a via à circulação normal.

Pode-se citar, ainda, que tais ensaios são feitos de maneira aleatória ou apenas focada em áreas onde os defeitos são bastante aparentes, cobrindo uma área muito pequena da rodovia e, dessa forma, corre-se o risco de não serem detectados os locais com problemas ainda não aparentes.

Os ensaios não destrutivos possuem como vantagem o fato de não causarem estragos na estrutura pré-existente na rodovia, exigem pouca ou nenhuma interferência no trânsito normal de veículos, cobrem uma extensão muito maior e fornecem uma gama de dados significativamente superior, se comparados aos métodos destrutivos.

A alternativa apresentada é o *Ground Penetrating Radar* – *GPR*, descrito como um método geofísico de avaliação por meio da emissão de ondas eletromagnéticas de altas frequências (na faixa de MHz) que percorrem o solo, sofrendo refrações e reflexões em interfaces e estruturas existentes no subsolo, retornando à superfície, sendo então captadas e interpretadas para revelar alterações na estrutura investigada.

A depender do equipamento utilizado, os dados podem ser obtidos sem interrupção do tráfego, na velocidade normatizada da via e tem o potencial de fornecer informações sobre toda a extensão do trecho investigado, representando um ganho comparativo superior em termos de produtividade, tempo de execução e segurança.

Há um campo ainda com potencial para desenvolvimento no que se refere à calibração do equipamento e interpretação dos dados. Nesse prisma, este trabalho busca evidenciar as características do equipamento, ressaltar suas potencialidades e evidenciar seu uso, apresentando resultados de trabalhos executados no Brasil e no exterior e destacando os métodos utilizados e os resultados obtidos.

1.4 OBJETIVO GERAL

Investigar as principais características técnicas e o nível de informação fornecido por equipamentos do tipo *Ground Penetrating Radar* - *GPR* na investigação não destrutiva da estrutura de pavimento asfáltico.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Detalhar as características técnicas dos principais equipamentos utilizados para investigação não destrutiva em estruturas de pavimentos;
- Identificar os modelos de equipamentos do tipo GPR disponíveis;
- Levantar a quantidade de informações geradas no processo de investigação de estruturas de pavimento com utilização de equipamentos do tipo GPR;
- Analisar em que perspectivas as informações geradas por sistemas do tipo GPR podem ser úteis à tomada de decisão na avaliação de estruturas de pavimento flexível.

2 CAPPÍTULO I – MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTOS

Neste capítulo são identificados os principais métodos de avaliação de pavimentos, suas características, vantagens, desvantagens e potencialidades.

Como já apresentado na Introdução deste trabalho, os revestimentos asfálticos são estruturas construídas para dar trafegabilidade às vias, garantindo conforto e segurança no transporte de pessoas e cargas.

Ponto essencial para que esses padrões sejam garantidos é a avaliação sistemática e proativa, de modo a avaliar se as condições inicialmente pretendidas se garantem ao longo do tempo, inclusive no que diz respeito ao desgaste esperado e à evolução da vida útil projetada do pavimento.

É por meio dessa avaliação sistemática que serão identificadas falhas construtivas, defeitos precoces e a eventual necessidade de execução de reparos e correções na estrutura da via, além de fornecer insumos para determinação do momento adequado e o tipo de intervenção em cada caso.

“A finalidade da avaliação de pavimentos é levantar informações que sirvam como subsídio para a tomada de decisão sobre a sua eventual manutenção ou reabilitação. Além disso, permite estabelecer modelos de previsão de desempenho, estudar critérios de aceitabilidade, sistematizar as informações em sistemas de gerência de pavimentos, etc.” (VIEIRA e GANDOLFO, 2013).

Nessa definição ficam claros os principais componentes de uma avaliação de estruturas de pavimento, com focos principais no controle de qualidade e na identificação de possíveis necessidades de intervenções corretivas e de conservação.

Segundo Bernucci et al (2006) existem dois critérios básicos para avaliação de um pavimento: avaliação funcional e avaliação estrutural.

Nos dizeres dos autores, a avaliação funcional está focada nas questões de segurança, conforto ao rolamento, condições de superfície, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidades superficiais.

Doutra forma, a avaliação estrutural está focada nas questões de capacidade de carga, ou seja, avalia o quanto a estrutura suporta em termos de esforço, quantificando as deformações permanentes e recuperáveis, estabelecendo parâmetros para a vida útil do pavimento e identificando momentos e métodos de intervenção.

Os mesmos autores afirmam que as deformações elásticas (recuperáveis), normalmente são avaliadas por equipamentos comumente chamados de deflectômetros, os quais medem os deslocamentos verticais (deflexões) do pavimento.

No caso das deflexões plásticas (definitivas) são acumuladas ao longo dos anos e se configuram em afundamentos, normalmente localizados na trilha de roda ou em locais específicos e são medidos por equipamentos do tipo treliça normatizada.

Embora o GPR não esteja classificado entre os equipamentos que realizam medidas de deflexão, mas sim de análises de espessura de camadas e das características físicas dos materiais empregados na estrutura, sua utilização vem sendo incentivada na investigação de estruturas de pavimentos devido ao seu caráter não destrutivo, custo/benefício e velocidade na obtenção e processamento dos dados em campo.

Para efeito de avaliar o comportamento dessas deformações ao longo do tempo, os autores identificam três categorias de métodos de avaliação: métodos destrutivos, métodos semidestrutivos e métodos não destrutivos.

2.1 MÉTODOS DESTRUTIVOS DE INVESTIGAÇÃO

Como sugere a definição, os métodos de investigação destrutivos provocam algum tipo de dano na estrutura pré-existente no pavimento, geralmente para retirada de uma parte de material (corpo de prova) para que este passe por testes e sejam identificadas suas características em termos de composição, peso, estrutura etc. Vejamos a transcrição abaixo:

Um método destrutivo é aquele que investiga a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento por abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo recolher amostras de cada material até o subleito e realizar ensaios de capacidade de carga *in situ*. Pela sua própria natureza destrutiva só pode ser empregado em alguns poucos pontos selecionados como representativos de cada segmento a ser avaliado. Bernucci et al (2006, Cap. 10, pág. 13).

Com base na definição acima é possível identificar as principais características dos métodos destrutivos de investigação de pavimentos, ou seja:

- a) Será causado dano físico ao pavimento, mediante a abertura de trincheiras e/ou furos de sondagem para coleta de material (corpo de prova);
- b) Normalmente são coletados materiais de todas as camadas (revestimento, base e sub-base);
- c) Alguns dos principais ensaios são realizados em laboratório, de modo a identificar as principais características dos materiais empregados e seu estado atual;
- d) Pouca representatividade quanto à extensão total avaliada, diante da característica destrutiva do processo;

Entre as principais informações obtidas por esse método investigativo estão: massa específica, teor de umidade, grau de compactação, granulometria dos materiais, espessura das camadas, teor e envelhecimento do ligante etc.

A seguir são apresentadas imagens ilustrativas de aberturas realizadas no pavimento para coleta de materiais por meio dos ensaios destrutivos.

É perceptível que os efeitos da investigação na estrutura do pavimento são danosos, causando impactos significativos na estrutura e exigindo correção cuidadosa posteriormente para que não se torne um ponto frágil após a intervenção.

Outros pontos que merecem destaque nesse método de investigação são o tempo de execução, a logística para extração do material e as metodologias para análise e obtenção dos resultados.

Por se tratar de abertura de janelas e furos na estrutura do pavimento, tal atividade demanda certo período de tempo para sua execução, consequentemente, redonda em um processo lento e de pouca produtividade.

Figura 2 - Exemplos de extração de corpos-de-prova e de poços de sondagem



Foto: Dynatest, 2004



Fonte: Bernucci et al (2006)

Também há de se considerar a logística envolvida na execução de tais extrações, havendo a necessidade de sinalização da rodovia, muitas vezes com interrupção parcial do tráfego, de modo a garantir a segurança da equipe de inspeção e dos usuários da rodovia.

Os ensaios realizados para identificação das características dos materiais também demandam certo tempo, conhecimentos específicos e equipamentos apropriados. A maioria desses ensaios depende da existência de um laboratório equipado para sua execução e análises necessárias.

VIEIRA e GANDOLFO (2013) também elencam as principais características dos métodos destrutivos tradicionais para investigação de estruturas do pavimento, destacando a necessidade de abertura de cavas ou janelas no pavimento, com utilização de sondas rotativas ou outros equipamentos de corte, no intuito de identificar a espessura das camadas e determinar as características dos materiais empregados e o estado em que se encontram.

As desvantagens citadas pelos autores são as já comentadas nos parágrafos anteriores, ou seja: forte impacto no fluxo de veículos, diante da necessidade de controle e/ou fechamento da via; informações precisas, porém pontuais; baixa produtividade, com procedimentos demorados; danos causados à estrutura e necessidade de reparos posteriores.

Por todo o exposto, deve-se avaliar com cautela a quantidade e a extensão desse tipo de avaliação no leito da rodovia, uma vez que provoca danos à estrutura do pavimento, possui pouca abrangência sobre a extensão da obra e a logística e execução dos testes e ensaios demandam conhecimentos e pessoal especializado para boa qualidade dos resultados.

2.2 MÉTODOS SEMIDESTRUTIVOS DE INVESTIGAÇÃO

De maneira geral, os métodos semidestrutivos provocam algum tipo de dano ao pavimento, no entanto utilizam técnicas e equipamentos que exigem janelas e abertura bem menores no corpo da rodovia, quando comparados aos métodos destrutivos.

Nos dizeres de VIEIRA e GANDOLFO (2013) um dos métodos mais conhecidos nessa modalidade de investigação é aquele que utiliza equipamentos portáteis para medir a capacidade de carga de um pavimento. O equipamento apresentado pelos autores é o *Dynamic Cone Penetrometer- DCP* (Cones Dinâmicos de Penetração).

Conforme destacado por SACHET (2007) uma das principais aplicações do DCP é a avaliação expedita dos materiais do subleito e das camadas de base e sub-base, fazendo comparação com o CBR (*California Bearing Ratio*) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia), um dos métodos mais consagrados e utilizados para medir a resistências de solos e outros materiais aplicados às obras rodoviárias.

Figura 3 – Exemplo de equipamentos DCP de avaliação expedita de solos



Fonte: Bernucci et al (2006)

Por se tratar de equipamento compacto e de fácil manuseio, sua aplicação pode ser mais simples que os métodos apresentados anteriormente, além de necessitar de menor intervenção destrutiva nas camadas investigadas.

Também há de se destacar sua maior produtividade, já que exige menor abertura na rodovia e consome menor tempo na execução de seus testes.

No entanto as informações fornecidas por este método ainda são restritas, se limitando a um parâmetro de comparação com o CBR, além de não se aplicar às camadas de revestimento, mas somente às camadas mais profundas.

2.3 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS DE INVESTIGAÇÃO

Como já mencionado, os ensaios não destrutivos possuem como vantagens o fato de não causarem estragos na estrutura pré-existente na rodovia, exigem pouca ou nenhuma interferência no trânsito normal de veículos, cobrem uma extensão relativamente maior do trecho investigado e fornecem uma gama de dados significativamente superior, se comparados aos métodos destrutivos.

Ainda segundo Bernucci et al (2006) os equipamentos mais utilizados para a realização de ensaios não destrutivos em estrutura de pavimentos estão divididos em três categorias específicas: carregamento quase-estático (viga *Benkelman*); carregamento vibratório (*dynalect*) e carregamento por impacto (*Falling Weight Deflectometer* – FWD).

Destaque-se que o GPR não se enquadra nas categorias defendidas pelos autores, uma vez que se trata de equipamento com características geofísicas, com emissão de ondas eletromagnéticas para leitura das características dos materiais e espessura das camadas do pavimento, não estando focados nas medidas de deflexão tradicionais. A seguir são abordadas duas das categorias citadas pelo autor:

Carregamento quase-estático (**Viga Benkelman**): desenvolvido na década de 1950, o processo utiliza ensaio de placa ou viga *Benkelman*. Consiste na instalação de um aparato sobre o corpo do pavimento, após a adequada calibração, entre duas rodas traseiras de um caminhão com um tipo e uma carga padrão (8,2 ton) e sensores farão as leituras dos deslocamentos durante a passagem desse caminhão, resultando, por correlação, em um valor representativo das deflexões sofridas pela carga aplicada sobre a via.

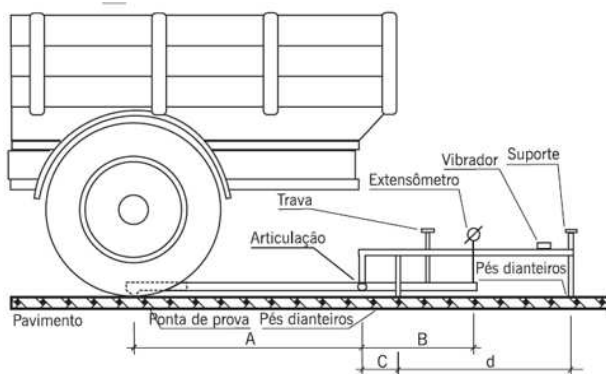
Segundo os autores, os passos a serem seguidos para realização do ensaio completo seriam os seguintes:

- colocar a ponta de prova da Viga *Benkelman* entre os pneus da roda geminada traseira do caminhão, exatamente sob seu eixo;
- realizar a leitura inicial do extensômetro, o qual deve estar a uma distância segura para proteção do operador e localizada sobre o braço móvel da Viga;
- fazer com que o caminhão se afaste lentamente até 10m da ponta de prova ou até que o extensômetro não acuse mais variação na leitura;
- realizar nova leitura nos resultados do extensômetro.

A leitura final é representativa do deslocamento do pavimento e todo o deslocamento recuperado é associado à deformação elástica do pavimento (deflexão).

O esquema abaixo ilustra os principais componentes do ensaio.

Figura 4 – Esquema de Viga Benkelman (DNER-ME 24/94 e medida em campo).



(a) Esquema da viga Benkelman (DNER ME 24/94)

Fonte: Bernucci et al (2006)

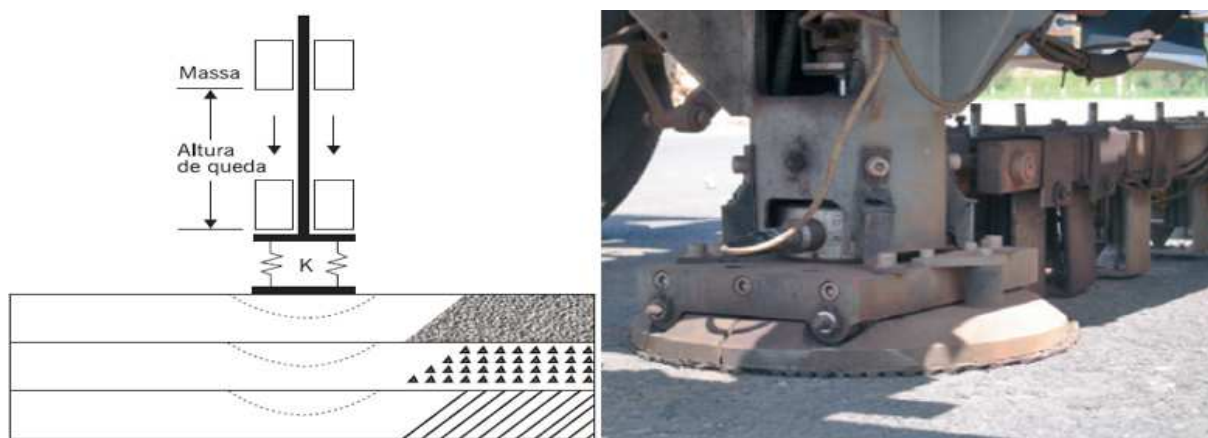


(b) Medida com viga Benkelman em campo

Bernucci et al (2006) destacam que este é um ensaio demorado e de pouca precisão, quando utilizada a viga convencional, no entanto destaca a existência de vigas automatizadas, onde as leituras de deslocamento são realizadas por medidores elétricos do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), deflectógrafo digital, com leituras automáticas da bacia de deflexão, altos níveis de precisão e acompanhado de um software para processamento de dados.

Carregamento por impacto – *Falling Weight Deflectometer* - FWD: com origem em meados de 1980, o processo consiste em deixar um peso cair de uma certa altura sobre uma placa colocada sobre o pavimento e medir os efeitos que essa queda gera em termos de deformações na estrutura, por meio de uma série de sensores instalados ao longo do trecho que se deseja investigar.

Figura 5 - Esquema de leitura com FWD e utilização em campo



Fonte: Bernucci et al (2006)

Em linhas gerais, os dois métodos apresentados buscam evidenciar o comportamento do pavimento ao receber uma carga, ou seja, o quanto dessa carga será absorvida, qual o nível da deformação causada no pavimento e qual o impacto dessa deflexão na vida útil da via.

A informação central dessa investigação é a chamada bacia de deflexão, traduzida como sendo a dissipação da carga ao longo da estrutura do pavimento.

Analizadas as leituras, é possível estabelecer os pontos onde as deflexões são mais expressivas e identificar com maior nível de precisão os locais e o tipo de reforço necessário para se corrigir eventuais defeitos do pavimento.

No entanto esses dois métodos, apesar de não provocarem estragos no pavimento e permitirem um número maior de leituras, ainda precisam de equipamentos praticamente estáticos, com interrupção ou controle parcial do fluxo de veículos por períodos consideráveis, a depender do nível de informação requerido para análise.

É nesse ponto que se apresentam os métodos geofísicos de investigação de estruturas de pavimento. Cabe deixar claro que os equipamentos de análise geofísica de estruturas de

pavimentos não operam com a lógica de análise de bacias de deflexão, mas sim, pela análise das características físicas, dielétricas e estruturais dos materiais que a compõe.

Em estudo bastante abrangente, contemplando várias unidades da federação nos Estados Unidos da América (EUA), materializado no Relatório 626 (*NCHRP Report 626*), emitido no âmbito do Programa Nacional de Cooperação para Pesquisa Rodoviária (*National Cooperative Highway Research Program*), Quintus et al (2009) apresenta estudos comparativos entre vários métodos não destrutivos de investigação de pavimentos, elencando suas principais características, equipamentos, metodologia e potencialidades.

Os autores introduzem o assunto destacando as dificuldades já apontadas para os métodos destrutivos de investigação e destacando os recentes avanços em termos de métodos não destrutivos, tais como: lasers, GPR, FWD, equipamentos compactos de penetração em solos, infravermelho e sismógrafos.

Também há destaque à utilização do método empírico-mecanicista de elaboração de projetos e avaliação de estruturas asfálticas, com foco na análise dos módulos dos materiais a serem utilizados.

De acordo com os autores, os estudos tiveram como objetivo identificar tecnologias de investigação não destrutiva de pavimentos com capacidade atual para medir a qualidade das camadas do pavimento durante sua construção ou logo após sua conclusão, servindo como método de garantia da qualidade durante a construção ou como critério de aceitação para recebimento das obras.

Um dos principais pontos defendidos pelos autores é a necessidade de que os parâmetros de avaliação e critérios de aceitação estejam bem definidos nos estudos iniciais, no projeto e em todas as fases da obra, de modo a permitir a avaliação objetiva dos valores identificados, compatibilizando aquilo que esteja formalizado em contratos e outros instrumentos congêneres com as informações geradas pela investigação do pavimento.

Alguns pontos cruciais são elencados por Quintus et al (2009) tidos como limitadores para alcançar êxito na utilização dos equipamentos de investigação, assim identificados:

a) acurácia e precisão do equipamento ou protocolo utilizado para medir propriedades específicas dos materiais: dificuldade em definir um valor padrão em algumas propriedades não lineares e viscoelásticas dos materiais, além da dependência quanto aos procedimentos de interpretação dos dados;

b) manuais de procedimentos de coleta e interpretação dos dados: avaliar a existência de manuais e procedimentos padronizados para realização dos testes e análise dos resultados para estimar as propriedades dos materiais;

- c) disponibilidade de padrões e procedimentos para realização dos testes (protocolos): verificar se existem testes padronizados para estimar as propriedades requeridas dos materiais;
- d) produtividade na coleta de dados: parâmetros de produtividade na coleta dos dados;
- e) interpretação dos dados: tempo e necessidade de equipamentos e softwares auxiliares para interpretar os dados;
- f) custo dos equipamentos: envolve custo inicial do equipamento, software adicional e equipamentos acessórios, necessários para realização dos testes e obtenção dos resultados, além de custos operacionais e de manutenção, incluindo a calibração.

Levando em consideração as informações acima, os pesquisadores estabeleceram alguns tipos de equipamentos para a pesquisa, elencando uma série de características e justificativas para a escolha de cada um deles, conforme descrição abaixo:

- a) *Deflection Based Technologies* (deflectômetros): tanto o *Falling Weight Deflectometer – FWD*, quanto o *Low Weight Deflectometer – LWD*, foram escolhidos por sua larga utilização em várias agências de trânsito nos Estados Unidos e pela existência de grande base de dados históricos sobre sua utilização;

Figura 6 - *Falling Weight Deflectometer – FWD* e *Low Weight Deflectometer – LWD*



Fonte: Quintus et al (2009)

- b) *Dynamic Cone Penetrometer – DCP* (cone dinâmico de penetração): selecionado pela sua utilização em algumas das agências envolvidas na pesquisa e pela sua capacidade de avaliar características das camadas de base e sub-base em campo, sem necessidade de equipamento ou software auxiliar para interpretação dos resultados;

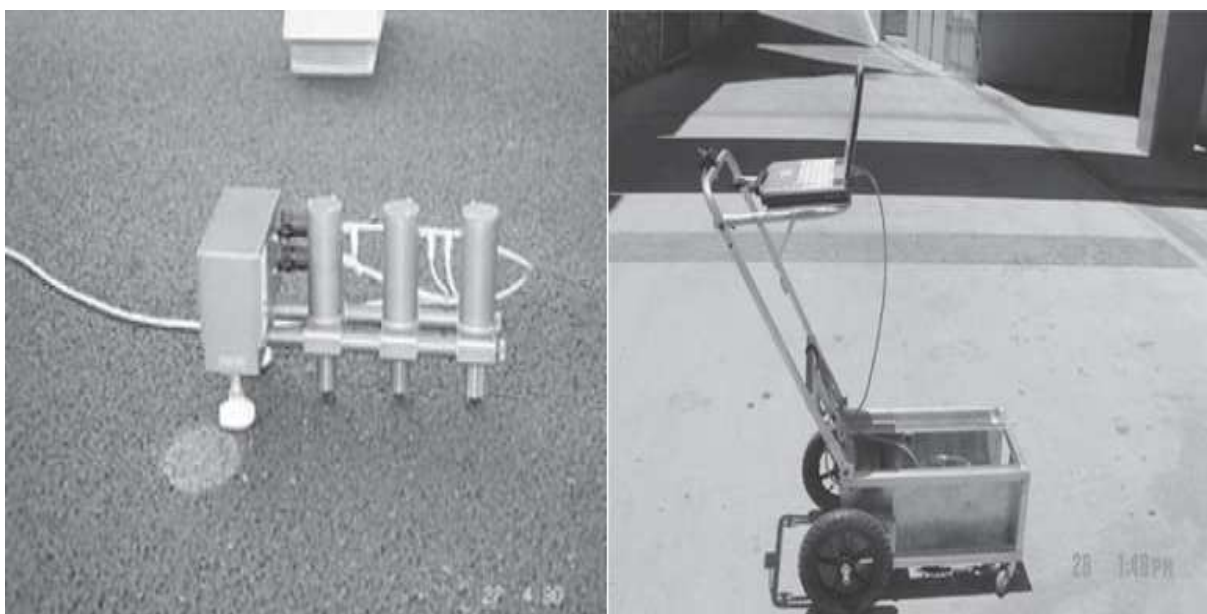
Figura 7 - *Dynamic Cone Penetrometer – DCP* – equipamento e uso em campo



Fonte: Quintus et al (2009)

c) *Seismic Pavement Analyzer – SPA* (sismógrafo): tanto o *Portable Seismic Pavement Analyzer – PSPA* (sismógrafo portátil), quanto o *Dirt Seismic Pavement Analyzer – DSPA* (sismógrafo profundo) foram incluídos na pesquisa por apresentarem a capacidade de avaliar o módulo das camadas do pavimento, tanto em camadas de maior espessura, quanto nas mais finas, além de sua aplicação na avaliação de camadas estruturais e no revestimento;

Figura 8 – Sismógrafo (DSPA e PSPA)



Fonte: Quintus et al (2009)

d) *GeoGauge* (densímetro): selecionado pela simplicidade em sua utilização e pela possibilidade de uso para medir o módulo resiliente das camadas de subleito, base e sub-base;

Figura 9 – GeoGauge: equipamento e utilização em campo



Fonte: Quintus et al (2009)

e) *Non-Nuclear Electric Gauges* (densímetro elétrico, sem tecnologia nuclear); *Non-Roller-Monted Devices*: a principal vantagem do densímetro elétrico é o fato de não possuir carga nuclear, garantindo a segurança dos envolvidos no processo. Foi incluído na pesquisa devido aos avanços que vem apresentando em suas funcionalidades.

Figura 10 - *Non-Nuclear Electric Gauges* (densímetro elétrico, sem tecnologia nuclear)



Fonte: Quintus et al (2009)

Os autores esclarecem que os trabalhos foram realizados em duas etapas. A primeira destinada a analisar se os equipamentos de avaliação não destrutiva possuem a capacidade para identificar inconsistências nos materiais e detectar diferenças físicas que afetem o projeto.

A segunda etapa do programa teve a finalidade de analisar se os equipamentos de avaliação não destrutiva são passíveis de inclusão nas rotinas de verificação da qualidade das obras executadas, refinando os protocolos e a interpretação dos dados. Além disso, há a pretensão de evidenciar as limitações dos métodos de avaliação não destrutiva.

Quintus et al (2009) argumentam que os módulos dos materiais, medidos em laboratório, são parâmetros importantes para todas as camadas no modo mecanístico-empírico de desenvolvimento de projetos de rodovias. Nos dizeres dos autores, o módulo resiliente é

parâmetro para as camadas estruturais (subleito, base e sub-base), enquanto o módulo dinâmico é utilizado para as camadas de revestimento.

Os autores apontam uma comparação entre os resultados obtidos em laboratório e aqueles oriundos da utilização dos equipamentos de avaliação não destrutiva (DCP, DSPA, PSPA, GeoGauge e deflectômetros). Em resumo, nenhum dos equipamentos foi capaz de atingir os valores obtidos em laboratório para os módulos dos materiais ensaiados, no entanto os autores apontam uma aproximação entre esses valores e uma tendência de estabilidade em relação aos valores obtidos em laboratório.

Para corrigir a diferença identificada entre os ensaios de laboratório e aqueles realizados com os equipamentos não destrutivos, os autores sugerem um procedimento de ajuste, de modo a conferir comparabilidade entre os dois processos. Segundo os autores as diferenças entre os resultados estavam relacionadas à densidade e à humidade dos materiais e não tinha relação com propriedades volumétricas.

Após os ajustes, o DSPA e o GeoGauge obtiveram, respectivamente, 86 e 79% de sucesso em identificar locais com anomalias, seguidos pelo DCP e LWD, que apresentaram cerca de 2/3 de sucesso. Tanto o densímetro elétrico quanto o GPR apresentaram resultados abaixo de 50% e foram considerados inadequados para esse tipo de teste.

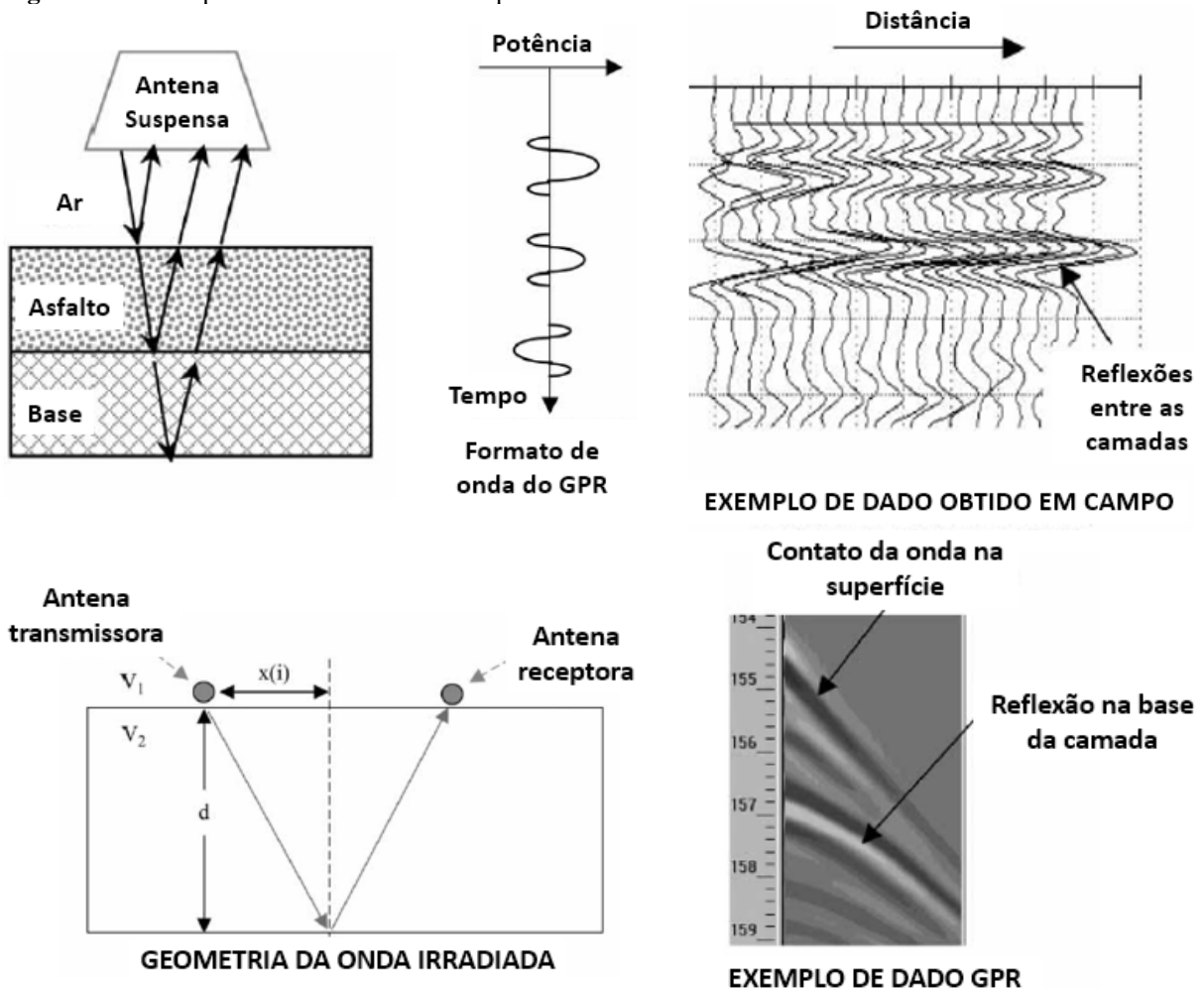
3 CAPPÍTULO II – CARACTERÍSTICAS E POTENCIALIDADES DO GPR

Maser et al (2005) explica que o *Ground Penetrating Radar* – GPR trabalha com utilização de pulsos eletromagnéticos de curto alcance, onde uma antena transmite um sinal que reflete nas camadas do pavimento e retorna ao equipamento na forma de uma onda.

A depender das características de cada camada, a resposta refletida pelo pavimento gera uma onda modificada em termos de formato e tempo de retorno, a qual é captada pelo equipamento e convertida em um gráfico, denominado radargrama.

O esquema retratado a seguir demonstra graficamente o comportamento da onda e de que maneira o equipamento realiza a leitura das camadas.

Figura 11 – Princípios do método GPR – comportamento da onda



Fonte: Adaptado de Maser et al (2005)

Seguindo a sequência das imagens apresentadas no esquema acima (**Figura 11**), pode-se identificar cada processo individualmente.

A primeira imagem (alto à esquerda), mostra o comportamento da onda quando utilizada uma antena do tipo “*horn antenna*”, onde a mesma antena emite e recebe de volta o sinal emitido para as camadas do pavimento.

A segunda figura (alto centro) mostra o modelo da onda emitida e recebida pelo GPR e como ela viaja através das camadas e de volta para o equipamento.

Já na terceira imagem (alto à direita) está demonstrado um exemplo de imagem gráfica gerada pelo equipamento como resultado das leituras efetuadas (radargrama), onde é possível observar as mudanças geradas na onda a cada alteração nas camadas do pavimento.

O segundo conjunto de imagens (abaixo à esquerda) mostra o comportamento da onda quando utilizado um equipamento do tipo “*Ground-coupled CMP Method*”. Este método utiliza um sistema com duas antenas, onde o sinal é emitido pela primeira e captado pela segunda antena, gerando um gráfico com as principais alterações de camadas, refletidas nas ondas emitidas e captadas pelo equipamento.

Na última imagem gerada (abaixo à direita) está o gráfico gerado por este tipo de equipamento e que demonstra os pontos onde há transição entre as camadas do pavimento.

Segundo Maser et al (2005) a resolução do gráfico resultante da avaliação com o método GPR depende de alguns fatores específicos, tais como: características dos materiais em termos de constante dielétrica; uniformidade nas características dos materiais entre as camadas do pavimento a ser avaliado; características e calibração do equipamento, entre outros.

Outras características e potencialidades do GPR são apontadas por outros autores, descrevendo casos de sucesso com a utilização da ferramenta e comentando suas principais características técnicas, principalmente quanto ao comportamento da onda gerada pelo equipamento e a interpretação dos dados produzidos.

Segundo Vieira e Gandolfo (2013), a onda sofre influência das propriedades existentes nos materiais, tais como permissividade elétrica e condutividade elétrica. O contato com cada tipo de material gera uma resposta diferente, a qual é captada pela antena de retorno e gera a informação de alteração a cada mudança no solo.

Componente principal na concepção do método é o estabelecimento do tipo de sinal a ser emitido e recebido pelo equipamento.

Basicamente o equipamento opera em altas e baixas frequências, sendo que as primeiras oferecem maior detalhamento nos resultados, porém alcançam menores profundidades. Já no caso das antenas de baixa frequência, perde-se um pouco no quesito resolução de imagens, mas há um ganho em relação ao alcance das ondas em termos de profundidade nas camadas do pavimento.

Figura 12 – GPR – capacidade de alcance em função da potência da antena.



Fonte: Adaptado de Lopes (2009).

Nos dizeres de Aguiar (2005), existem equipamentos que operam nas mais diversas frequências, no entanto os mais utilizados em levantamentos geotécnicos estariam na faixa que varia entre 100MHz e 1,5GHz.

Segundo as informações constantes no estudo de Cunha et al (2016) as antenas de GPR podem operar em frequências que variam entre 10 e 2500 MHz.

Em esquema apresentado por Lopes (2009) e adaptado conforme **Figura 12**, é possível identificar as principais implicações na escolha da antena a ser utilizada nos levantamentos com uso do GPR.

Em linhas gerais, antenas com maior frequência geram ondas de menor comprimento, permitindo imagens mais nítidas e precisas, porém possuem pouco alcance em termos de profundidade.

Em sentido contrário, antenas que operam em frequências menores emitem ondas mais longas e proporcionam imagens com menor nível de detalhamento, porém, permitem efetuar levantamentos em maiores profundidades.

Como resultado, o equipamento gera um gráfico em 2D, em alta definição, onde é possível identificar as principais alterações na consistência dos materiais e, dessa forma, seria possível estabelecer a espessura de cada camada do pavimento, sendo exigido, no entanto que a composição dos materiais em cada camada apresente diferenças em suas propriedades eletromagnéticas.

3.1 TESTES E CALIBRAÇÃO DO MÉTODO GPR

Como já mencionado em parágrafos anteriores, a utilização do GPR no Brasil ainda é bastante restrita e pontual, no entanto, sua utilização em países mais desenvolvidos, como os Estados Unidos, já conta com alguns casos de sucesso.

Maser et al (2005) busca evidenciar as potencialidades para a utilização do GPR para medir a espessura de camadas do pavimento, com um nível de precisão razoável e com uma quantidade de informação bem superior aos métodos convencionais de investigação de pavimento.

O correto dimensionamento em projeto e a execução adequada das camadas de pavimento é fator chave para a garantia da vida útil projetada para a obra.

Além da espessura adequada nas camadas projetadas para uma rodovia, a qualidade dos materiais empregados também é fator primordial para atendimento aos padrões estabelecidos e garantia de atendimento ao projeto elaborado. Não é raro detectar obras com desvios em relação à espessura das camadas projetadas, bem como em relação às características dos materiais a serem empregados.

Como as técnicas tradicionais são caras, demoradas e com baixa capilaridade sobre a totalidade das obras, normalmente são detectados pontos críticos, onde os defeitos são visíveis e são aplicados testes e ensaios localizados e específicos para esses pontos.

Maser et al (2005) destaca uma relação percentual entre a espessura das camadas e a vida útil do pavimento, afirmando que um desvio em torno de 14% na espessura de uma camada de revestimento, que deveria ter 91mm, pode resultar em uma diminuição em torno de 40% na vida útil da rodovia.

Os autores argumentam que poderiam ser adotados “*pay factors*”, traduzido como “fator de pagamento” que poderia ser previsto em contrato para exigir do contratado a reparação equivalente da perda de vida útil do empreendimento.

Para obter sucesso na implementação da espessura das camadas como parâmetro para aplicação do fator de pagamento, seria necessário o estabelecimento de métodos de levantamento confiáveis e com alto nível de precisão.

Os métodos tradicionais de investigação de pavimentos se apresentam com capacidade de produzir resultados com altos níveis de precisão, no entanto, os autores consideram que tais métodos são muito demorados, causam danos à estrutura do pavimento e seus resultados cobrem uma área muito pequena da obra investigada.

O que se deseja é um método capaz de produzir informações de maneira rápida, sem causar dano à estrutura pré-existente e com capacidade de gerar uma quantidade de dados representativa da extensão a ser investigada.

Deacon et al (1997) apud Maser et al (2005) afirmam que, para que seja considerado um parâmetro válido para efeito de constituir o fator de pagamento, o método de avaliação de pavimentos deve apresentar um nível de precisão em torno de 2,5mm.

Em se tratando de pavimento de concreto betuminoso, o GPR vem se apresentando como uma das tecnologias mais estáveis para a determinação da espessura das camadas.

Os mesmos autores destacam que estudos recentes vêm sendo desenvolvidos por agências americanas de construção e manutenção rodoviária, evidenciando que as informações obtidas com o uso do GPR vêm apresentando uma variação em torno de 2 a 5% na espessura das camadas, quando os resultados são comparados com os valores de referência.

Tal desvio é considerado aceitável pelos autores, quando levadas em conta as vantagens do método GPR (não destruição da via, maior cobertura na extensão da obra, obtenção de dados na velocidade da via etc.).

Segundo Maser et al (2005) a maioria dos estudos de caso com uso do GPR foram realizados com utilização de antenas do tipo “*air-coupled horn*”, equipamento instalado em um veículo, com leitura na velocidade da via, sem necessidade de intervenções no tráfego.

Os autores defendem que maior acurácia poderia ser obtida com a utilização de medições em menor velocidade, com antenas do tipo “*ground coupled*”, equipamento com utilização de duas antenas e que se mantém mais próximo ao solo e, portanto, requer alguma interferência no trânsito.

Conforme apontado por Maser et al (2005), foram realizados testes em laboratório para avaliar a acurácia do método GPR.

Tais testes foram realizados com simulação de três tipos de mistura asfáltica, aplicadas em quatro espessuras diferentes de camadas de revestimento e com utilização de emulsão asfáltica que simula as características dielétricas de um revestimento asfáltico típico.

A pista de teste avaliada foi construída com 5 m de comprimento, 1,2 m de largura e 53,3 cm de profundidade, contando com uma base de agregados em quatro espessuras diferentes (33; 38,1; 43,2 e 48,3 cm). Também foram aplicados revestimentos em quatro espessuras diferentes sobre a base mencionada (5, 10, 15 e 20 cm).

Os testes foram repetidos, alterando-se a composição da mistura asfáltica utilizada no revestimento e foram utilizados equipamentos de GPR equipados com “*horn antenna*” e “*ground-coupled antenna*”, configurada no modo CMP (duas antenas equidistantes).

Para efeito de validar as informações, foram utilizadas como paradigma as espessuras calculadas previamente à construção da pista de testes e os resultados obtidos através da utilização do GPR.

Ficou demonstrado que o método CMP não se mostrou eficiente em avaliar camadas com espessuras abaixo de 100mm, enquanto o modo “*horn antenna*” se mostrou eficiente para avaliar camadas com dimensões a partir de 50mm.

Maser et al (2005) elenca uma série de testes realizados em larga escala em rodovias americanas, catalogando a espessura de camadas asfálticas em diversas regiões e com diversos métodos construtivos.

Tal levantamento teria como finalidade comparar tais valores com informações disponíveis em bancos de dados dos órgãos oficiais, bem como realizar levantamentos atualizados, com utilização de outros métodos e com foco na validação dos números obtidos com utilização do GPR.

Para realizar as medições, foi utilizado o equipamento portátil, acoplado à traseira de um veículo, denominado “*bike rack*”. No caso do CMP, foi utilizado equipamento para fixação das antenas, de modo a mantê-las equidistantes do ponto central e as medidas eram obtidas eletronicamente a cada 2mm.

Os mesmos autores destacam levantamentos realizados em rodovias do estado da Califórnia (USA), envolvendo pavimentos com características pré-selecionadas pelos pesquisadores, de modo a avaliar o potencial do método GPR em diferentes situações investigativas em pavimentos.

Entre os tipos selecionados, foram testados asfaltos de maior e menor espessura sobre base de agregados, asfaltos sobre concreto e camadas aplicadas sobre revestimentos pré-existentes, de maior e menor espessura.

Também foram considerados revestimentos de idades diferentes, uma vez que o tempo e o uso da rodovia podem alterar as características dos materiais e pode fazer com que o comportamento das ondas emitidas pelo GPR se altere, a depender das mudanças promovidas pelo envelhecimento dos materiais e/ou pelo esforço natural do tráfego.

Nos trechos de asfalto, foram coletadas informações de forma contínua, com utilização de equipamento do tipo GSSI modelo 4108 (*horn antenna*), equipada com sistema de coleta e tratamento de dados do tipo GSSI SIR-10H e com leituras a cada 152.4mm em cada trilha de roda.

Em locais especificados, foram realizados testes com utilização do método CMP, tanto em sentido longitudinal, quanto em sentido transversal, utilizando equipamento do tipo GSSI *ground-coupled*, com antenas de 1.5 GHz, modelo 5100.

As informações obtidas em campo foram comparadas com registros existentes nos bancos de dados do Departamento de Trânsito da Califórnia (USA), apresentando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98, indicando um alinhamento muito próximo de 100%, entre os números obtidos nos ensaios de campo e os registros oficiais.

Inicialmente, os dados obtidos com utilização de equipamentos tipo *horn antenna* foram comparados sem a utilização de qualquer tipo de parâmetros de calibração e as informações iniciais apontaram certas premissas e desvios nos dados obtidos via GPR, indicando a necessidade de correção por meio de parâmetros de calibração.

Para corrigir tais desvios, os autores apontam que foi desenvolvido método de pesquisa por informações passíveis de serem utilizadas como parâmetros, com base nas maiores reflexões na base das camadas do pavimento, ou seja, pontos onde a divisão entre camadas era perceptível e documentados em registros oficiais.

Mesmo com a aplicação dos parâmetros de calibração, foram identificadas ocorrências de dispersões pontuais nos resultados tratados, tendo sido criada uma linha de regressão, resultando em um nível de precisão de 4mm e uma diferença absoluta entre todos os seis trechos comparados de 1.8mm. O desvio padrão da amostra ficou em 7mm, com diferença absoluta entre os trechos de 3.4mm.

Segundo os mesmos estudos, os resultados obtidos com utilização do método CMP se apresentaram bem próximos daqueles obtidos com utilização de equipamentos do tipo *horn antenna*, no entanto aponta que não foi possível utilizar o método CMP para espessuras abaixo de 75mm.

Da mesma forma do ocorrido com o processo utilizando *horn antenna*, também foram identificados desvios pontuais nos dados, indicando a necessidade de utilização de parâmetros

de calibração, adotando-se o mesmo processo utilizado para calibrar os resultados obtidos com os ensaios com *horn antenna*.

Mesmo assim, a dispersão identificada após a aplicação do parâmetro de calibração apresentou números mais elevados para o método CMP, em comparação aos números obtidos com *horn antenna*.

Como o fato ocorreu em locais onde houve a aplicação de uma segunda camada sobre um revestimento já existente, os estudos apontam, como possível causa, a dificuldade de se distinguir entre o revestimento novo e a camada pré-existente, uma vez que as características dielétricas das duas camadas são bastante parecidas.

Em razão de dificuldades do método CMP em identificar as características de uma das rodovias listadas neste estudo, foi excluída uma das unidades analisadas e os resultados do método são apresentados com um registro a menos.

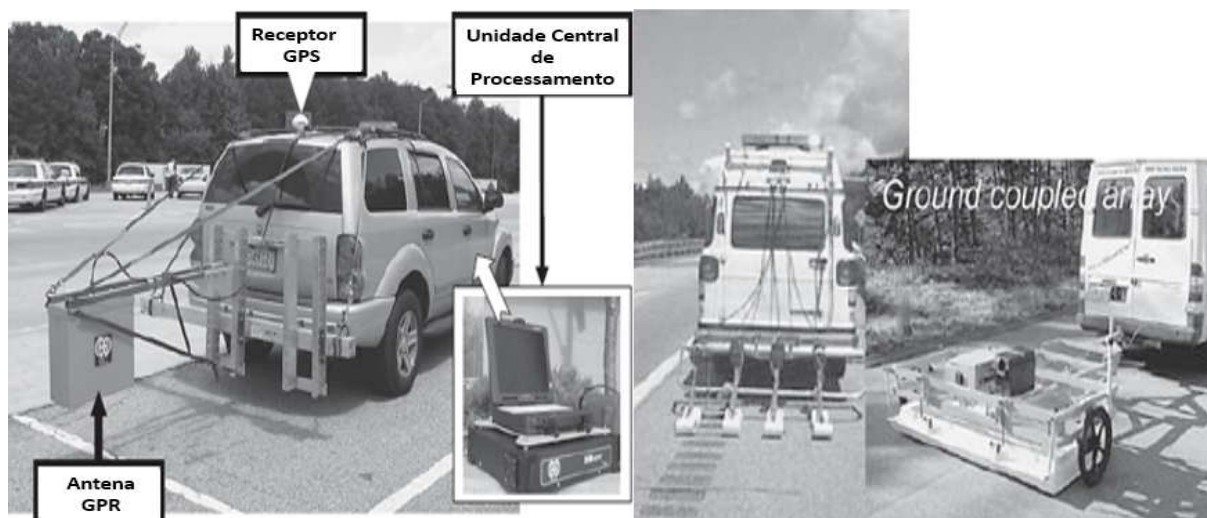
Ao final, o nível de precisão do método CMP ficou em 4mm, com diferença absoluta entre as amostras de 2.4mm. O desvio padrão ficou em 6.8mm, apresentando valor superior aos números apresentados com utilização do método *horn antenna*.

O mesmo estudo apresentado ao final do capítulo anterior analisou a utilização do GPR em seus experimentos, apontando casos de sucesso da ferramenta e oportunidades de melhorias, tal como descrito a seguir.

Ground Penetrating Radar – GPR (radar de penetração no solo): escolhido pela utilização em algumas agências americanas em projetos de reabilitação, com a finalidade de estimar espessura das camadas e identificar a presença de vazios nas camadas do pavimento.

A depender dos resultados dos estudos, pode se tornar uma das ferramentas mais importantes para avaliação do produto final a ser entregue às agências.

Figura 13 – Exemplos de antenas de GPR



Fonte: Quintus et al (2009)

De forma geral, os autores apontam que o método GPR (*single antenna method*) não se apresentou aplicável para identificar as características e propriedades dos materiais empregados na construção de rodovias. O equipamento não foi capaz de fornecer informações precisas sobre os módulos e a resistência dos materiais.

Adicionalmente, a pesquisa afirma que, para esse modelo de equipamento, os valores de densidade e humidade devem ser informados para que os demais valores sejam calculados, fato que pode gerar grande variabilidade nos resultados. A título de exemplo, os autores apontam locais onde as informações do GPR apontavam para a existência de materiais de alta densidade, no entanto investigações adicionais comprovaram que essas propriedades não estavam presentes nas camadas investigadas.

Também foi apontada a desvantagem quanto ao treinamento especializado para utilização do equipamento, bem como sobre a necessidade de calibração quanto às propriedades dielétricas dos materiais existentes nos locais de investigação.

O sucesso da ferramenta ficou por conta do processo de identificação da espessura das camadas, conforme apresentado na pesquisa.

Relativamente à avaliação de camadas de revestimento, ficou demonstrado que o equipamento com antena dupla possui potencial para resultados mais precisos, no entanto o documento aponta a necessidade de maiores estudos.

Talvez o maior diferencial desse tipo de equipamento seja a possibilidade de instalação em um veículo e a possibilidade de efetuar as medições na velocidade normal da via, sem a necessidade de intervenções no tráfego normal da rodovia.

Entre outras vantagens, destacadas por Vieira e Gandolfo (2013), podemos destacar:

- a) obtenção de uma gama bem maior de informações em intervalos curtos de tempo;
- b) preservação da integridade do pavimento;
- c) informação sobre um trecho contínuo, minimizando ensaios destrutivos.

Percebe-se que há necessidade, utilidade e oportunidade para que maiores estudos e investimentos sejam realizados nesse tipo de investigação, de modo a tornar as informações cada vez mais confiáveis, úteis e precisas para diagnosticar estruturas de pavimento em menor tempo, com custos razoáveis, com níveis de precisão adequados e com o menor impacto possível sobre as estruturas pré-existentes.

4 CAPÍTULO III - METODOLOGIA

Para consecução dos objetivos traçados, foi realizada pesquisa bibliográfica consistente, com a finalidade de identificar estudos e trabalhos técnicos e acadêmicos anteriores que tragam informações úteis sobre as características dos métodos não destrutivos de investigação de pavimentos e sua aplicação na prática, tanto no Brasil, quanto no exterior.

Nos dizeres de PÁDUA (2010) “A pesquisa bibliográfica é a realizada através da identificação, localização e compilação dos dados escritos em livros, artigos de revistas especializadas, publicações de órgãos oficiais etc.”.

Os sítios eletrônicos podem ser fontes excelentes de informações técnicas, divulgadas pelos fabricantes dos equipamentos ou por empresas que utilizem tais equipamentos para prestação de serviços.

Como se trata de técnica ainda pouco desenvolvida no Brasil, a maior parte da bibliografia e informações foram obtidas em pesquisas realizadas em outros países, principalmente nos Estados Unidos da América - EUA.

4.1 EXPERIÊNCIAS COM USO DO GPR NO BRASIL

Como já comentado anteriormente, o uso de equipamentos do tipo GPR no Brasil, para avaliação de estruturas de pavimentos, ainda é restrito e pouco difundido na literatura da área, contando com iniciativas isoladas e estudos de casos específicos em trabalhos acadêmicos.

Neste tópico serão listados casos de utilização de GPR para investigação de estruturas de pavimento em território nacional, destacando os principais problemas enfrentados, o equipamento utilizado, os resultados obtidos e as oportunidades de melhorias observadas.

4.1.1 Experiência 1 – Alça Viária do Pará (BR-316)

Em sua Dissertação para conclusão de Mestrado junto à Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Aguiar (2005) apresenta pesquisa aprofundada sobre aspectos geofísicos e geodésicos na utilização de GPR para avaliação de pavimentos flexíveis.

O local escolhido pelo autor é a Alça Viária do Pará, projeto de interligação e integração do Leste daquele estado, conectando a BR-316 à PA-151, facilitando a logística e o transporte de pessoas e bens entre as cidades de Ananindeua, Marituba, Bujaru, Acará Moju, Barcarena e a Capital (Belém).

A obra busca facilitar acessos à região Sul do estado, Porto de Vila do Conde e as Zonas de Processamento e Exportação (ZPE), desafogando o tráfego no Porto de Belém e facilitando a locomoção de pessoas e cargas na região.

Figura 14 - Localização Política da Alça Viária do Pará



Fonte: Aguiar (2005)

O problema enfrentado pelo autor diz respeito a recalques, deformações e degenerações precoces no revestimento, tendo a obra sido construída há pouco mais de 1,5 ano da data de realização dos trabalhos de campo.

Aguiar (2005) lembra que a região onde foi realizada a obra pesquisada se compõem, basicamente de dois tipos de solos: terras firmes e várzeas.

Também destaca a existência de grandes áreas com solos moles, com presença de elevada umidade e que, alternativamente à terraplenagem tradicional, foram utilizadas soluções

tais como: membranas sintéticas, grelhas geotêxteis, agulhamento no encontro de pontes e drenos fibroquímicos para reforço do pavimento.

O equipamento utilizado por Aguiar (2005) para os levantamentos de campo foi um modelo GSSI SIR System 3000, equipamento compacto, de uso manual e destinado a investigações em curta distância, normalmente arrastado sobre a superfície pelo próprio operador.

Figura 15 - GPR - GSSI - Modelo SIR System 3000



Fonte: UnB – Instituto de Geologia

A primeira metade da **Figura 15** mostra a antena com o bastão de arrasto, o cabo de conexão à unidade central de processamento e o odômetro, destinado a medir a distância da leitura. Vale ressaltar que o GPR somente faz a leitura enquanto há registro de movimentação do equipamento por este componente.

Acoplada ao odômetro está o conjunto de antenas, a qual tem a finalidade de emitir e receber as ondas eletromagnéticas e repassar as informações à central de processamento.

Na segunda metade da Figura 15 está a central de processamento, a qual tem a finalidade de receber as informações do odômetro, das antenas, do GPS e outros componentes e realizar análise e processamento das mesmas, de modo a gerar informações úteis ao trabalho de investigação de pavimentos.

Considerada o ponto central do equipamento, a unidade de processamento conta com um display integrado, onde é possível acompanhar as leituras em tempo real e já realizar

algumas análises no próprio local de investigação, sem a necessidade de programas de computador e outras informações de processamento.

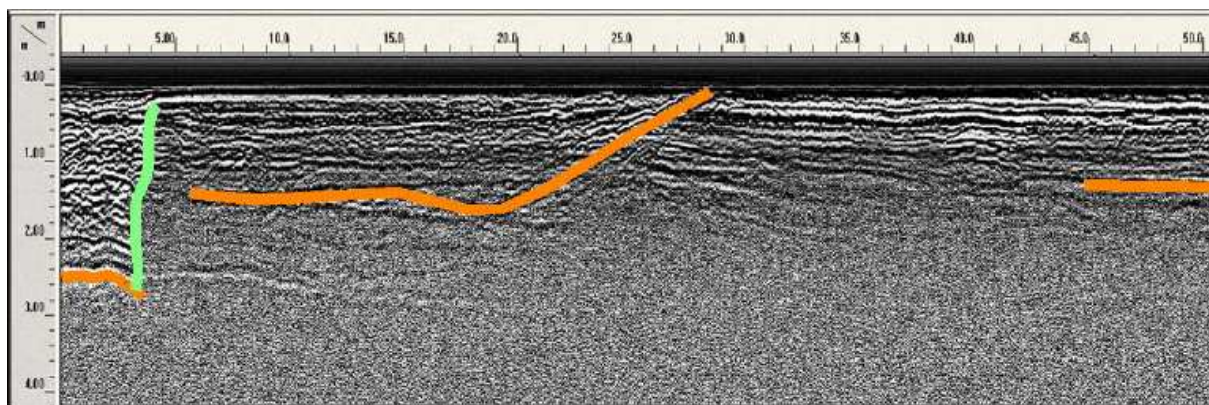
Segundo o autor, foi realizado o imageamento partindo da BR-316 e indo no sentido da Ponte Guamá, em razão de existir evidências de problemas estruturais no trecho e ocorrência de aterro em consolidação.

Há registro de utilização de uma antena de 80MHz e do software Gradix para interpretação/análise dos dados e, posteriormente, o software teria sido substituído pelo programa canadense Radan for Windows, tendo ocorrido a substituição da antena por outra com potência de 200MHz.

Muito provavelmente em razão das características do radar utilizado (arrasto manual – GSSI SIR 3000 System), o trecho apresentado no estudo percorreu uma distância relativamente curta (400m, aproximadamente) pouco representativa diante da extensão da obra selecionada.

No entanto a figura abaixo demonstra que os defeitos precoces, identificados no corpo do pavimento podem ser explicados pela presença de elevada umidade em camadas rasas, demonstrando que o sistema de aterro e/ou de drenagem podem não estar funcionando de acordo com o esperado, comprometendo a estrutura das camadas do pavimento.

Figura 16 – Leitura com GPR – Excesso de umidade na BR-316.



Fonte: Aguiar (2005).

Na **Figura 16**, apresentada acima, é possível analisar um trecho de 50m, retirado do trabalho de Aguiar (2005), onde o autor demonstra o início do trecho com alto índice de umidade (linha verde) e os caminhos que essa umidade percorre, chegando até a superfície do pavimento (linha laranja).

A suspeita do autor se baseia no fato de haver constatado grande atenuação nas ondas eletromagnéticas do radar, representada pela área menos marcada do radargrama, o que indicaria grande presença de água, condutora natural de eletricidade, o que causa grande atenuação nas ondas eletromagnéticas emitidas pelo GPR.

Em suas conclusões, Aguiar (2005) afirma que o GPR se mostrou eficiente para avaliar a presença de excesso de umidade nas camadas de revestimento do trecho por ele analisado, porém faz alguns alertas para a necessidade de calibração e consideração das características dos materiais e topografia da região investigada.

4.1.2 Experiência 2 – BR-101 Nordeste – Lote 7

Também vale destaque ao artigo desenvolvido por Cunha et al (2016) para o VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, destacando trabalho de investigação de espessura de camadas na BR-101, lote 7, trecho nordeste.

A BR-101 é uma rodovia com extensão superior a 4.500 Km, conhecida como Translitorânea, por percorrer praticamente toda a costa leste do país.

Figura 17 – BR-101 – Translitorânea



Fonte: Wikipedia

O lote 7, mencionado pelo autor em sua pesquisa, corresponde a um trecho de 43,9 quilômetros, entre as cidades de Cabo de Santo Agostinho e Ribeirão, ambas localizadas no estado de Pernambuco (PE).

Segundo o autor, o objetivo do trabalho aqui apresentado era de verificar denúncias recebidas pela Advocacia-Geral da União – AGU, sobre supostas irregularidades no projeto e na construção daquele trecho de rodovia.

Embora não esteja claro no artigo apresentado, supõe-se que o equipamento utilizado nos estudos foi o mesmo apresentado na Experiência 1, citada anteriormente, uma vez que todos os profissionais envolvidos na elaboração do referido artigo são membros da Universidade de Brasília (UnB) e o único equipamento de GPR pertencente à instituição é aquele já apresentado no caso anterior.

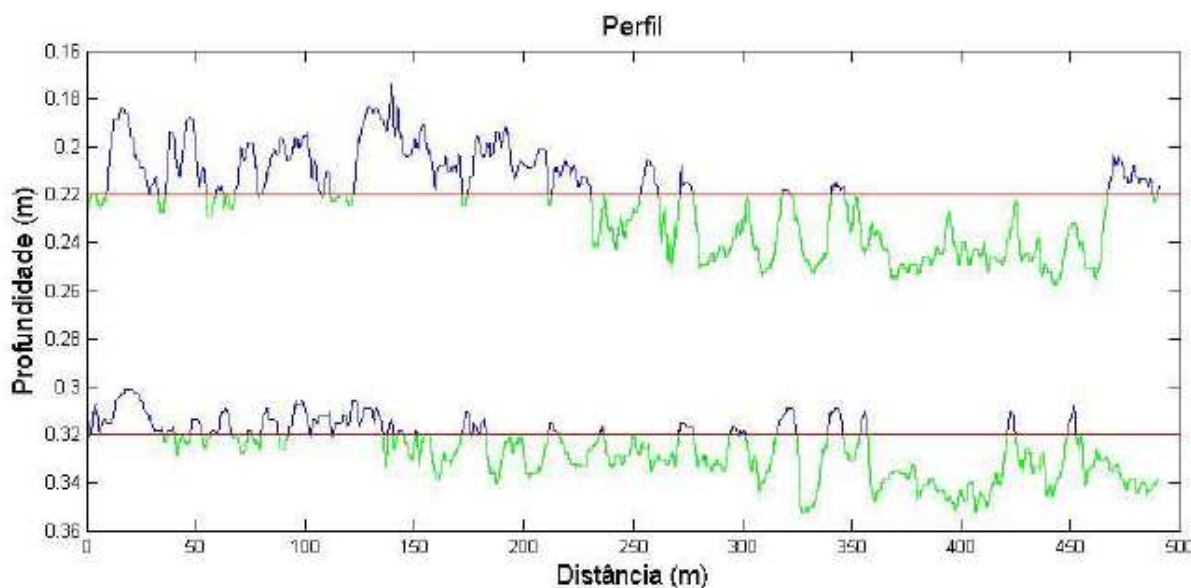
De acordo com as informações do estudo, trata-se de pavimento em concreto, com espessura do revestimento projetada para 22 cm, aplicada sobre uma camada de base de 10 cm.

Para calibração do equipamento, foram utilizadas as referências quanto ao posicionamento das barras de aço instaladas nas placas de concreto para diminuir o atrito provocado pela passagem dos veículos, chamadas de barras de transição.

Ao final do estudo, ficou evidenciado que espessura média da camada de revestimento ficou em torno de 20 cm, enquanto a camada de base apresentou 12 cm de média.

Adicionalmente, apontou-se a grande variabilidade entre os trechos, verificando-se grandes diferenças na espessura das camadas entre um segmento e outro, indicando falha construtiva que poderá gerar problemas estruturais futuros.

Figura 18 – Radargrama analítico – BR-101 Nordeste – Lote 7



Fonte: Cunha et al (2016)

Na **Figura 18**, mostrada acima, as linhas vermelhas indicam onde deveria estar a espessura de cada camada e a linha azul/verde indica onde o GPR identificou a base de cada camada investigada, deixando evidente a grande variação em relação ao valor projetado.

O autor conclui afirmando que o equipamento se mostrou bastante eficaz nos testes, sendo capaz de identificar as camadas e suas delineações de topo e base.

Também há destaque para o tempo de aquisição das informações e seu processamento, além do custo operativo do equipamento, considerado bastante atrativo pela equipe que realizou o trabalho.

4.1.3 Experiência 3 – ANTT – VIA 040

Merece registro o trabalho elaborado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2016), em relatório das condições da Rodovia BR-040, importante trecho rodoviário que liga a Capital Federal à cidade de Juiz de Fora (MG).

O trecho analisado faz parte de uma rodovia federal concedida à exploração de empresa privada (VIA040 S/A) e o objetivo declarado do trabalho foi no sentido de implantar o Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), por meio do qual se pretende criar indicadores e parâmetros para fornecer previsões de deterioração do pavimento.

No caso do trabalho levado a efeito pela ANTT (2016), as informações dos levantamentos de campo são um pouco mais singelas, no tocante à utilização do GPR.

Tal fato pode ser explicado pela gama mais elevada de informações geradas pelo relatório emitido pela Agência, abrangendo vários outros fatores que interferem na segurança e conforto do motorista ao trafegar pela rodovia.

Nas informações da ANTT (2016) também não ficou claro qual o modelo de GPR utilizado nos levantamentos, no entanto com base na imagem divulgada no corpo do relatório, é possível concluir que se trata de um equipamento do tipo GSSI RoadScan Sir 30, ou assemelhado, devido ao padrão da antena acoplada ao veículo.

Esse modelo funciona com a antena acoplada à estrutura de um veículo, normalmente na parte traseira ou frontal, com odômetro conectado à roda, e com GPS plugado ao equipamento para posicionamento via satélite do local de investigação.

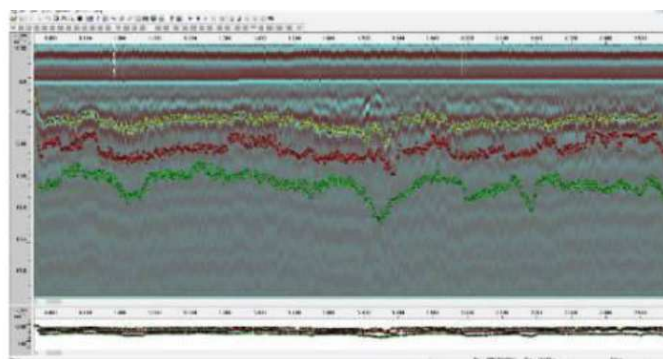
O equipamento utilizado pela ANTT apresenta-se mais adequado à investigação de pavimento em rodovias, uma vez que pode ser instalado na estrutura de um veículo e, após correta calibração, poderá ser utilizado em velocidades que não impactem o uso do trecho investigado, ou que causem o menor impacto possível aos usuários da rodovia.

Segundo o relatório aqui apresentado, os levantamentos foram realizados a cada metro e os segmentos marcados a cada 50 km para melhor organizar e tratar as informações após a aquisição de dados em campo.

A figura abaixo demonstra a foto do equipamento utilizado nos estudos da ANTT e o gráfico padrão, gerado pela ferramenta como resultado da análise de espessura de camadas na BR-040.

Devido à baixa qualidade do gráfico publicado, não é possível estabelecer as escalas trabalhadas no referido documento, porém, é possível identificar oscilação significativa no que diz respeito à espessura das camadas investigadas.

Figura 19 – GSSI RoadScan e radargrama da VIA040.



Fonte: ANTT (2016).

Após realizar as leituras e equipe de inspeção realizou a abertura de poços de inspeção física ao longo do trecho, de modo a confrontar e validar as informações geradas pelo GPR na determinação da tipologia das camadas, identificação dos materiais envolvidos e heterogeneidade das estruturas.

A figura abaixo mostra a equipe realizando a abertura e análise de um poço/janela de inspeção e note-se que, embora o levantamento com a utilização do GPR possa ser executado sem intervenções no tráfego, a execução dos poços de sondagem requer a interrupção parcial do fluxo de veículos e a sinalização da pista, para a garantir a segurança da equipe no trecho.

Figura 20 – Leitura com GPR – janelas de inspeção na BR040.



Fonte: ANTT (2016).

Segundo o texto do relatório da ANTT (2016), a análise e interpretação dos dados obtidos com a utilização do GPR foi realizada por meio do software Radan, com análise de resultados ponto a ponto, de toda extensão do trecho.

Ainda de acordo com publicação, os dados gerados pelo GPR podem apenas informar sobre as características dimensionais do pavimento e, para uma caracterização mais criteriosa dos materiais, é necessária a abertura de janelas de inspeção.

Os dados gerados com uso do GPR fazem parte do relatório emitido pela ANTT e foram considerados satisfatórios, quanto à determinação da espessura das camadas daquele trecho rodoviário, demonstrando que o equipamento é capaz de fornecer informações robustas e precisas na investigação não-destrutiva da estrutura de pavimentos.

4.1.4 Experiência 4 – Ilha do Fundão – UFRJ

Destaca-se trabalho elaborado por Lopes (2009) em dissertação para obtenção do título de mestre junto à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) no curso de engenharia civil.

O local escolhido por Lopes (2009) é a Cidade Universitária da UFRJ, localizada na Ilha do Fundão (RJ) e, segundo o autor, o principal motivo para tal escolha decorre de convênio firmado entre PETROBRAS/CENPES/COPPE, denominado Projeto Fundão.

No âmbito de tal convênio, desenvolvido pelo Laboratório de Pavimentos da COPPE, estariam sendo recuperados trechos de pavimentos das principais avenidas e ruas da Cidade Universitária, com utilização de diversas soluções tecnológicas.

Com o intuito de difundir a utilização do GPR, o equipamento foi adquirido ao amparo do convênio e incluído na relação de ensaios a serem realizados durante toda a vigência da pesquisa conjunta.

Com esse enfoque, foram realizados levantamentos com objetivos diversos, incluindo: identificação de poços de visita e de inspeção, espessura de camadas asfálticas, identificação de objetos enterrados, avaliação de estruturas em blocos intertravados e paralelepípedo, além de pontos onde houve substituição de materiais na via.

De acordo com Lopes (2009) sua pesquisa foi a campo com um equipamento fabricado pela IDS (*Ingenieria Dei Sistemi S.p.A.*), equipamento com o sistema RSI (*Radar for underground and Soil Investigations*), gerenciado por software K2 e *IDSGRED/LAYER*, para análise e visualização de dados na plataforma Windows 2000.

Foram utilizadas duas antenas, a primeira de 600MHz, para levantamentos até 10 metros de profundidade e a segunda de 1600 MHz, para profundidade máxima de 1 metro.

Na sequência de fotos abaixo é possível identificar o equipamento e o conjunto de acessórios (antena, central de processamento, conexões, veículo de arrasto e notebook para visualização/processamento dos dados).

Figura 21 – IDS Georadar – condução manual.



Fonte: Lopes (2009).

Nesse modelo também há a possibilidade de instalação do equipamento em um veículo e, após a correta calibração, é possível a utilização do conjunto em velocidades mais elevadas, permitindo cobrir maiores distâncias em menor tempo, sem perder em qualidade das informações geradas.

Nas imagens disponíveis em Lopes (2009) é possível visualizar a antena instalada em um suporte preso à parte traseira do veículo, o odômetro conectado à roda traseira esquerda e o notebook no interior do veículo para acompanhar e registrar as informações colhidas em campo.

Figura 22 – IDS Georadar – acoplado ao veículo.



Fonte: Lopes (2009).

Salienta-se que, embora o autor tenha apresentado o equipamento montado em um veículo, conforme **Figura 22**, este afirma que foi desenvolvido carrinho de arrasto, adaptado para operação manual, durante a realização dos levantamentos aqui relatados.

Devido às características de operação manual do equipamento e de autonomia do conjunto de baterias do equipamento, os trechos levantados nos estudos de Lopes (2009) são curtos e foram realizados em baixa velocidade.

O autor traz como novidade a possibilidade de sobreposição dos sinais gerados por cada antena, uma vez que trabalha com uma antena para curta profundidade (1600 MHz – até 1 metro) e outra para profundidades maiores (600 MHz – até 10 metros).

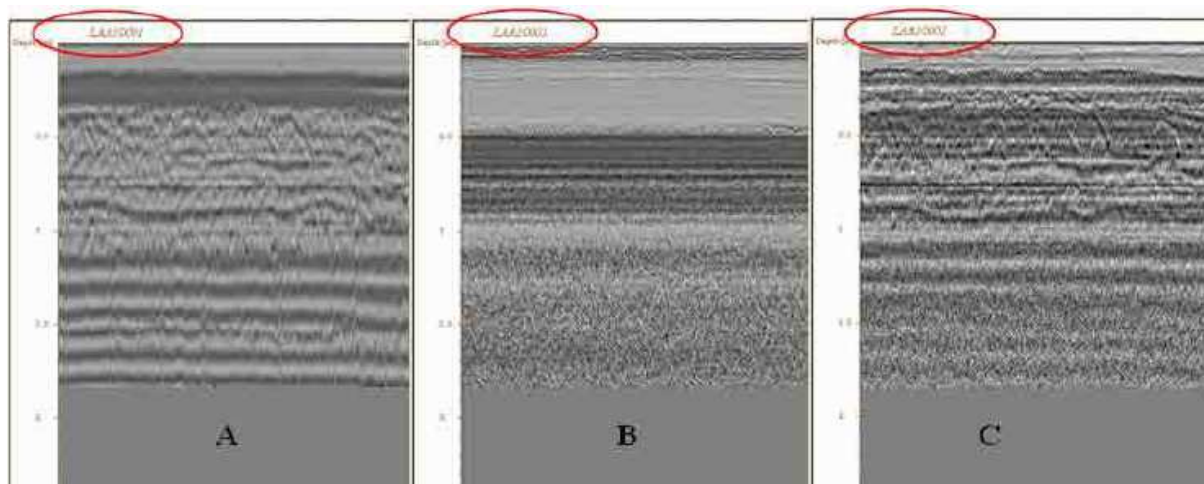
Além da sobreposição das duas antenas, o autor destaca a utilização dos seguintes filtros: F1 (*move start time*), F2 (*background removal*), F3 (*vertical bandpass filter*) e aumento de contraste.

O autor apresenta situação em que são mostradas três leituras, realizadas no mesmo trecho: a primeira imagem “A” com utilização da antena de 600 MHz, a segunda “B” com uso da antena de 1600 MHz e uma terceira que seria a junção das duas imagens acima “C”, permitindo uma imagem mais completa e precisa do trecho:

Com essa configuração de antenas, foram realizadas leituras em pavimento flexível, com revestimento em CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), pavimentos com intertravamento de blocos, pavimento com paralelepípedo, identificação de bueiros, localização de poços de sondagem etc.

As imagens geradas nesses levantamentos podem ser observadas a seguir:

Figura 23 – Leitura com GPR – interpolação de imagens/antenas.



Fonte: Adaptado de Lopes (2009).

De acordo com o radargrama apresentado na **Figura 24**, mostrada a seguir, é possível visualizar o resultado de uma investigação de um poço de visita com utilização do GPR, no âmbito do levantamento realizado na Ilha do Fundão.

Fica claro na imagem do radargrama o espaço marcado em cores diferentes e/ou em tons alterados, indicando haver uma falha naquele local, exatamente onde se encontra a abertura do referido poço de visita investigado.

Figura 24 – Leitura com GPR – radargrama de poço de visita.



Fonte: Lopes (2009).

Na **Figura 25**, está registrada leitura com GPR para uma estrutura de pavimentos em blocos intertravados, sendo possível identificar as interações dos blocos, bem como as camadas subjacentes e suas respectivas espessuras.

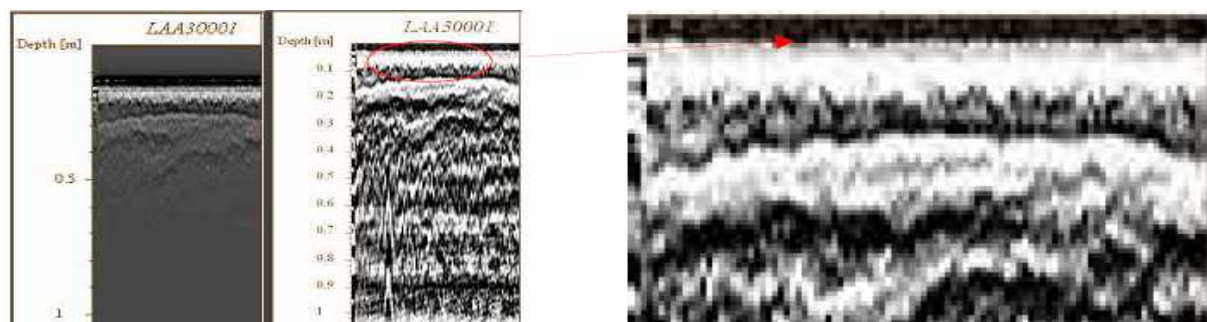
Figura 25 – Leitura com GPR – blocos intertravados.



Fonte: Lopes (2009).

Da mesma forma a **Figura 26** demonstra o resultado de um radargrama aplicado ao revestimento realizado em paralelepípedo, também evidenciando as interações dos blocos, bem como as camadas subjacentes e suas respectivas espessuras.

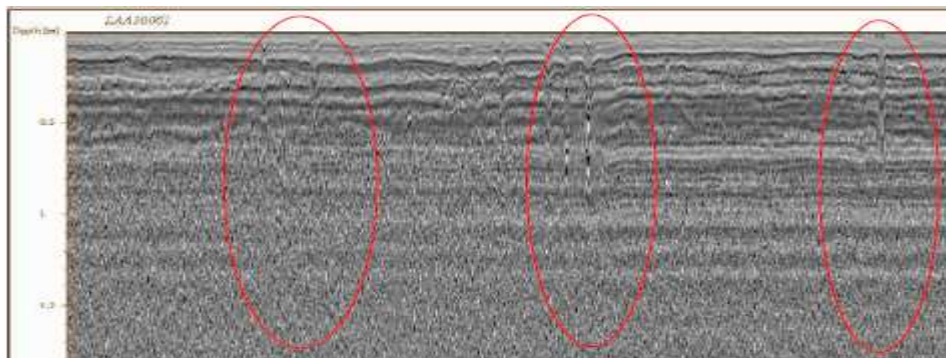
Figura 26 – Leitura com GPR – paralelepípedo.



Fonte: Lopes (2009).

Conforme marcado na **Figura 27**, é possível identificar com precisão a localização de poços de sondagem abertos no leito da rodovia para retirada de material para análise, ficando marcado no radargrama a diferença do material utilizado para reconstituir o pavimento deteriorado pela retirada do material para pesquisa.

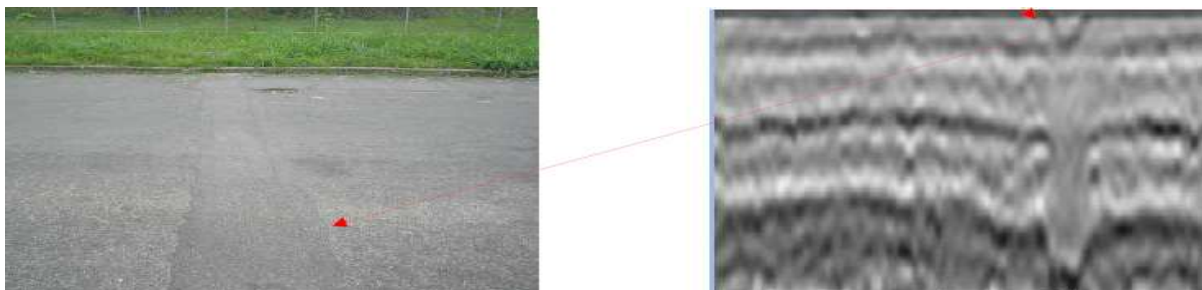
Figura 27 – Leitura com GPR – poços de sondagem.



Fonte: Lopes (2009).

Outra potencialidade destacada no trabalho de Lopes (2009), é possibilidade de se identificar materiais substituídos nas camadas do pavimento, tal como visto na **Figura 28**, é possível perceber alterações na composição da camada de revestimento, em razão de uma travessia na pista, recomposta com material diferente daquele depositado originalmente.

Figura 28 – Leitura com GPR - Substituição de material



Fonte: Lopes (2009).

Lopes (2009) conclui afirmando que o equipamento de georadar por ele utilizado, configurado com duas antenas (600MHz e 1600 MHz) apresentou imagens nítidas, contando, ainda, com auxílio do programa computacional para gerar ganho de qualidade pelos filtros disponíveis/aplicados.

As principais aplicações elencadas pelo autor foram: identificação de dutos enterrados, distinção de material de reforço do revestimento, irregularidades das superfícies de pavimentos intertravados de concreto e de paralelepípedo, aspectos de compactação do subleito, identificação de poço de visita e poços de sondagem.

Pelo demonstrado, há grande campo de estudo e aplicação para a tecnologia do GPR, estando em pleno desenvolvimento e podendo aprimorar e avançar em termos de simplificação do processo de calibração e interpretação dos dados na investigação de pavimentos.

Embora não mencionado pelo autor, o equipamento poderia ganhar em performance e eficiência, caso sua aplicação estivesse associada à utilização de veículo automotor, permitindo a coleta de dados em velocidades elevadas, cobrindo trechos maiores e preservando a qualidade das informações geradas.

Outra funcionalidade citada por Lopes (2009) é a possibilidade do cruzamento dos dados obtidos com a utilização do GPR para confronto com as informações de bacias de deflexão. Com esse tipo de comparação, é possível analisar a variação na espessura das camadas, mudança nas características dos materiais empregados e seu posicionamento ao longo de cada camada.

No entanto, os resultados dos estudos quanto às medidas de deflexão não são conclusivos, mas apenas apontam essa potencialidade para que seja desenvolvida em novos estudos e análises.

Os autores apontam alguns cuidados que devem ser tomados na interpretação dos dados pois, uma das principais influências sobre o método é a alteração nos níveis de umidade das camadas e, nesse ponto, alterações pontuais podem induzir a erros de interpretação e/ou gerar pontos cegos nos dados de leitura contínua.

Em pontos onde podem ocorrer dúvidas quanto aos dados gerados pelo GPR, informações adicionais podem ser buscadas, por meio de levantamentos deflectométricos com métodos não destrutivos, tais como Viga Benkelman e FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e, em último caso, abertura de janelas de inspeção.

Salienta-se que a adoção de ensaios destrutivos deve ser indicada apenas em locais onde foram geradas dúvidas e/ou em pontos onde os ensaios não destrutivos apontem alguma irregularidade que mereça ser investigada mais a fundo.

A principal finalidade do método é evitar que o pavimento pré-existente seja danificado, priorizando-se o maior número possível de informações obtidas por intermédio dos ensaios não destrutivos de investigação, mormente o GPR.

O que se percebe, mais uma vez, é que o GPR tem uma gama de aplicações importantes na investigação de pavimentos e deve-se considerar que os estudos realizados com utilização do georadar ainda não podem ser considerados conclusivos para determinar as características das camadas e dos materiais nelas contidos.

Mas o que se pode afirmar com segurança, é que o GPR realiza um diagnóstico rápido, seguro, sem nenhum ou com baixo impacto na utilização da via, sem causar quaisquer danos à estrutura pré-existente e com segurança para os operadores, já que não emite ondas radioativas ou algo do gênero.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou evidenciar as principais características técnicas dos equipamentos de investigação não-destrutiva de pavimentos, especialmente aqueles do tipo *Ground Penetrating Radar* – GPR.

Foram elencados os principais métodos utilizados para investigação de pavimentos, iniciando-se com os métodos destrutivos, considerados mais precisos e os mais tradicionais e conhecidos pelos profissionais que atuam na área de engenharia de rodovias, provocam danos à estrutura do pavimento, os ensaios demandam tempo e possuem baixa representatividade sobre a área investigada.

Também foram listadas as características dos métodos semidestrutivos, com semelhanças em relação ao anterior, provocam danos ao pavimento, porém em escala menor e utilizam instrumentos portáteis. Sua utilização, no entanto, ainda é restrita, em razão da abrangência de seus ensaios, restrita à correlação com índices como Índice de Suporte Califórnia e medida de resistência de materiais.

O foco principal está nos métodos não destrutivos, capazes de efetuar levantamentos em larga escala, sem provocar danos à estrutura pré-existente, permitem inúmeras repetições no mesmo ponto e permite o estabelecimento de procedimentos de investigação seletiva, minimizando a necessidade de ensaios destrutivos, que ficam direcionados a locais onde já existam evidências de problemas.

Dentre os equipamentos utilizados no método não destrutivo, o foco deste trabalho é o *Ground Penetrating Radar* – GPR, equipamento com uma proposta de realizar levantamentos em larga extensão, por meio de processo geofísico de emissão de ondas eletromagnéticas que são emitidas e captadas por antenas de grande capacidade, permitindo a coleta de informações na velocidade da via e sem necessidade de interrupção do fluxo de veículos.

No exterior, foram apresentados trabalhos como Maser et al (2006) que atestam as potencialidades do GPR para análise de espessura de camadas, inclusive com potencialidade para compor um indicador denominado “*pay factor*” ou fator de pagamento, o qual seria utilizado para responsabilizar financeiramente por erros de execução.

No Brasil, foram apresentados trabalhos que utilizaram o GPR em investigação/determinação da espessura de camadas de revestimento asfáltico em CBUQ, tais como o trabalho desenvolvido pela ANTT (2016) na BR-040, onde as informações geradas pelo GPR são utilizadas como parâmetro para compor índices que atestam a qualidade da rodovia.

Também foram listadas as investigações apresentadas por Cunha et al (2016), no lote 7 da BR-101, onde o GPR foi utilizado para localizar barras de aço na estrutura das placas de concreto e para determinar as espessuras das camadas do revestimento em concreto.

Foi destacado o trabalho realizado Lopes (2009) na malha viária da Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, onde foram realizados levantamentos com a conjunção de duas antenas para medir espessura de camadas, identificação de mudanças nas características de materiais, localização de poços de visita e de sondagem, além de identificação de objetos enterrados na área de investigação.

Consta, ainda, o estudo realizado por Aguiar (2005) na Alça Rodoviária do Pará, onde o GPR foi utilizado para identificar a ocorrência de excesso de umidade nas camadas do pavimento flexível, concluindo por falhas no sistema de drenagem dos aterros.

Quanto a análises de deflectometria e de módulos dos materiais, os estudos aqui analisados não são conclusivos quanto à capacidade do GPR para determinar tais características, sendo indicados novos experimentos e estudos nesse sentido.

O que ficou evidenciado neste trabalho é que o GPR é um equipamento com potencial elevado para avaliação de pavimentos em várias utilidades, sendo cabível melhorias e maiores estudos no sentido de estimular seu uso, simplificar seu processo de calibração e utilização em campo, bem como a interpretação dos dados e informações produzidas pelo método.

Com base nas informações geradas pelo GPR, é possível identificar pontos específicos para uma expedição mais criteriosa, direcionada e focada em locais já apontados pelo equipamento e que mereçam maior nível de aprofundamento, sendo indicados outros métodos não destrutivos e, em último caso, a adoção de métodos destrutivos.

Devido ao caráter intermediário desse trabalho, indica-se seu uso para consulta quanto às características e potencialidades de equipamentos não destrutivos de investigação de pavimentos, especialmente os do tipo GPR.

Novas pesquisa, estudos e análises devem ser incentivadas para que se aprofunde nas características, potencialidades e contribuições que esse tipo de equipamento pode oferecer para os trabalhos de investigação de estruturas de pavimentos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

SACHET, Taís. *Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem In Situ de Bases Granulares de Pavimentos Asfálticos*. Passo Fundo, 2007, 1v, Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia e Arquitetura de Passo Fundo.

AGUIAR, Júlio César Mascarenhas. *Radar de Penetração no Solo GPR): Aspectos Geofísicos e Geodésicos, Processamento e Análise em Pavimento Flexível*. Recife (PE), 2005, 1v, Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação). Universidade Federal de Pernambuco.

LOPES, Osvaldo Antunes. *Uso do GPR (Ground Penetrating Radar) em Trechos de Pavimentos da Cidade Universitária da UFRJ* - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009, XVII, 185 p. Dissertação (mestrado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil.

VIEIRA, Ruben, GANDOLFO, Otavio Coaracy Brasil. *Investigando a estrutura do pavimento por método não destrutivo (GPR)*. In: Reunião Anual de Pavimentação – RAPv, 42, Encontro Nacional de Construção Rodoviária – Enacor, 16, 12-14 nov 2013.

CUNHA, Matheus Rodrigues, BORGES, Welitom Rodrigues, CUNHA, Luciano Soares. *Investigação das espessuras das camadas de revestimento da rodovia BR-101, lote 7, trecho nordeste*. In: VII Simpósio Brasdileiro de Geofísica, 2016.

Bernucci, Liedi Baroiani, MOTTA, Laura Maria Goretti, CERATTI, Jorge Augusto Pereria, SOARES, Jorge Barbosa. *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. 3. Ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2006.

AIRES, Carmenisia Jacobina. *A Elaboração da Monografia*, 2012. (não publicado).

PADUA, Elisabeth M.M. *O trabalho monográfico como iniciação à pesquisa científica*. In: CARVALHO, Maria Cecília M. de. *Metodologia Científica Fundamentos e Técnicas: Construindo o Saber*. Papirus, Edição: 24ª, Revista e Ampliada, 2010. P. 147-175.

QUINTUS, Harold L. Von, RAO, Chetana, JR, Robert E. Minchin, NAZARIAN, Soheil, MASER, Keneth R. *NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction*. In: NCHRP REPORT 626, Washington D.C., 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Recurso de Desenvolvimento Tecnológico – RDT: *Análise do Comportamento e Desempenho dos Pavimentos da VIA040, Brasília/DF a Juiz de Fora/MG – Relatório Final*. Nova Lima/MG, 2016.

MASER, Keneth R., HOLLAND, T.J., POPOVICS, J.S. e ROBERTS, R. *NDE methods for quality assurance of new pavement thickness*. In: The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 7, No. 1, March 2006, 1–10, California, 2005.

Deacon, J.A., Monismith, C.L. and Harvey, J.T., Pay factors for asphalt concrete construction: *Effect of construction quality on agency costs*. Tech. Memo., TM-UCB-CAL/APT-97-1, 1997.